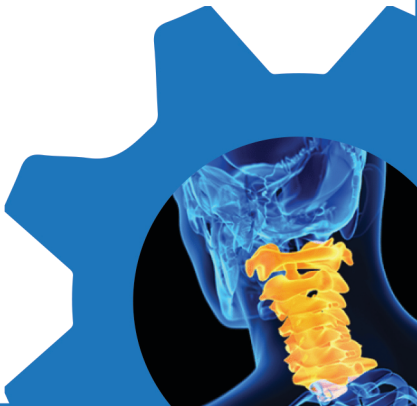


GAZI JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN – CHIEF

İsmail ŞAHİN

Gazi University, Ankara, Turkey
e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇE

Gazi University
e-mail: harungokce@yahoo.ca

Volkan YILMAZ

Gazi University
e-mail: volkan@gazi.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan Islami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Karadeniz Technical University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Herbert M. REYNOLDS

Michigan State University, USA

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

John KINUTHIA

University of South Wales, England

Jonathan C. BORG

University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY

University of Ontario Technology, Canada

Kürşad SEZER

Gazi University, Turkey

Shahin JALILI

Tebri University, Iran

Şakir TAŞDEMİR

Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ

John Moores University, England

Yasir JOYA

GIK Institute, Pakistan

DİL EDITÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)**TEKNİK EDITÖR / TECHNICAL EDITOR****Neslihan TOP**

Gazi University

e-mail: editorgjes@gmail.com**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Abidin ŞAHİNOĞLU

Adem TEKEREK

Ali GÜNEN

Babak SAFAEI

Barış ÖZLÜ

Cahit GÜRER

Cem GÖK

Çağrı Vakkas YILDIRIM

E. Kadir ÖZTEKİN

Eda AVANOĞLU SICACIK

Emine UÇAR

Emrullah SONUÇ

Engin NAS

Eray AKTEPE

Ercan Nurcan YILMAZ

Erdem ÇİFTÇİ

Fatih ÇELİK

Fatma Zehra SOLAK

Fecir DURAN

Gökhan DURMUŞ

Gökhan SUR

H. Fırat PULAT

Hakan ADA

Hanifi ÇİNİCİ

Hilmi Cenk BAYRAKÇI

Hüseyin ÇALIK

Hüseyin GÖKÇE

Kadir Berkhan AKALIN

Kemal AKYOL

Kürşad SEZER

Kürşat ÇUBUK

M. Ali KALAYLI

Muhammet Serdar BAŞÇIL

Munish Kumar GUPTA

Mustafa DEMİRBİLEK

Mutlu Tarık ÇAKIR

Nalan KAYA

Necaattin BARIŞÇI

Nijat IŞIK

Rafet DURGUT

Sabri ALTUNKAYA

Sedat ODABAS

Musa KILIÇ

Şakir TAŞDEMİR

Uğur YÜZGEÇ

Yakup TURGUT

Yüksel CELİK

Yüksel ABALI

Zeliha ERGÜL AYDIN

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık
Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312
e-mail: editorgjes@gmail.com

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Betonarme Kare Kolonların Doğrusal Olmayan Yerdeğiştirme ve Deformasyon Hasar Sınırlarının ASCESEI 41-17'ye göre İncelenmesi <i>Investigation of Nonlinear Displacement and Deformation Damage Limits of Reinforced Concrete Square Columns According to ASCESEI 41-17</i> Saeid FOROUGHİ, Bahadır YÜKSEL	1-14
ANP ve PROMETHEE Yöntemleri ile Akıllı Şehir Analizi: Ankara'da Bir Uygulama <i>Smart City Analysis with ANP and PROMETHEE Methods: A Case in Ankara</i> Senanur YAŞAR, Zümra POYRAZ, Rabia YUMUŞAK, Tamer EREN	15-28
İmplantasyon Uygulamaları İçin Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti-16Nb-4Sn Alaşımının Mikroyapı ve Biyouyumluluk Özelliklerinin İncelenmesi <i>Investigation of Microstructure and Biocompatibility Properties of Ti-16Nb-4Sn Alloy Produced by Powder Metallurgy for Implantation Applications</i> Ömer ÇAKMAK, Mehmet KAYA, Ebru ANNAÇ, Mustafa KÖM	29-40
Deprem Enkazı Sonrasında Keşif için Radyo Frekansıyla Uzaktan Kontrollü Sürünge Robot Prototipinin Gerçekleştirilmesi <i>Performing of Reptile Robot Prototype with Radio Frequency Remote Control for the Exploration After the Earthquake Ruins</i> Kemal KEDİKLİ, Bayram YILDIZ, Kenan TOKA, Abdullah GENÇ	41-48
AISI 304 Paslanmaz Döküm Çeliğinin Frezelemesinde İşleme Şartlarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Çapak Oluşumuna Etkisi <i>The Effect of Machining Conditions on Surface Roughness and Burr Formation in Milling of AISI 304 Cast Stainless Steel</i> Mehmet BOY, Mürsel AVCI	49-59
Yeni Bir Kent İçi Ulaşım Türü: E-scooter <i>A New Type of Urban Transportation: E-scooter</i> Hazal GÜLDÜR, Fatih KARAÇOR, Seda HATİPOĞLU, Kürşat ÇUBUK	60-73
AISI304 Paslanmaz Çeliğin Tornalamasında Kesici Takım Yükseklik Ayarının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Taguchi Ve ANOVA Yöntemiyle Analizi <i>Analysis By Taguchi And ANOVA Methods For The Effect Of The Cutting Tool Height Adjustment On Cutting Forces In Turning AISI304 Stainless Steel Material</i> Ercan DEMİRER, Yunus KAYIR	74-88
Bir Kaymalı Yatak Malzemesinin Kuru Ortam Abrasif Aşınma Davranışının Deneyisel Olarak İncelenmesi <i>Experimental Investigation of Dry Environment Abrasive Wear Behavior of a Plain Bearing Material</i> Recep DEMİRSÖZ	89-102
Kaplamalı Terminal Blok Ucunda Tasarımsal Değişim Yapılarak Mekanik Özelliklerinin Araştırılması <i>Investigation of Mechanical Properties on Coated Terminal Tip by Co-design</i> Mert ONAN, Ahmet Celal TOPKAYA, Eyyüp ÖKSÜZTEPE	103-109

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerinin Varlığında Birim Taahhüt Probleminin İncelenmesi:
Kahramanmaraş Örneği

*Investigation of Unit Commitment Problem in Presence of Pumped Storage Hydroelectric Power Plants:
The Case of Kahramanmaraş*

Fatma AVLİ FIRIŞ, İsmail KARADÖL, Mustafa ŞEKKELİ 110 - 121

Kontrollü Bozundurma Tekniği İle ZnO Nanopartikül Üretimi ve Karakterizasyonu

Fabrication and Characterization of the ZnO Nanoparticles by Controlled Decomposition

Osman ARSLAN 122 - 129

Uyku Apnesi Hastalarının Uyku Pozisyonu Verilerini Kaydeden Bir Sistem Tasarımı

Designing a System that Records the Sleeping Position Data of Sleep Apnea Patients

Adem GÖLCÜK, Mehmet BALCI, Sakir TASDEMİR, Serkan KÜÇÜKTÜRK, Hüsamettin VATANSEV,

Hülya VATANSEV 130 - 134

Büyükbaş Hayvanlar için Bulanık Mantık Denetleyiciler ile Nesnelerin İnterneti Temelli Bir İşkembe
Sağlığı İzleme Prototipinin Geliştirilmesi

*Development of Internet of Things-Based Rumen Health Monitoring Prototype with Fuzzy Logic Controllers
for Cattle*

Fatih GÜRCAN, İbrahim DOGRU, Murat DÖRTERLER, İsmail ATACAK 135 - 149

Sivi Seviye Ölçümü İçin Mekatronik Sistem Tasarımı Ve Uygulaması

Mechatronic System Design and Implementation for Liquid Level Measurement

Musa Faruk ÇAKIR 150 - 157

Yarı-açık bir Ahırda Sığır Vokalizasyonunu Tanımak için Ses Analizi

Sound Analysis to Recognize Cattle Vocalization in a Semi-open Barn

Güzin ÖZMEN, İlker Ali OZKAN, Seref İNAL, Sakir TASDEMİR, Mustafa ÇAM, Emre ARSLAN 158 - 167

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Nonlinear Displacement and Deformation Damage Limits of Reinforced Concrete Square Columns According to ASCESEI 41-17

Saeid Foroughi^a, S. Bahadır Yüksel^b

Submitted: 22.05.2021 Revised: 24.03.2022 Accepted: 29.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.01

ABSTRACT

Keywords: Seismic load, performance level, damage limit, displacement limit

^a Konya Technical University,
Engineering and Natural
Sciences Faculty,
Dept. of Civil Engineering
42130 - Konya, Turkey
Orcid: 0000-0002-7556-2118
e mail: saeid.foroughi@yahoo.com

^b Konya Technical University,
Engineering and Natural
Sciences Faculty,
Dept. of Civil Engineering
42130 - Konya, Turkey
Orcid: 0000-0002-4175-1156

*Corresponding author:
saeid.foroughi@yahoo.com

The deformation-based damage limits and plastic rotation properties of reinforced concrete square column models according to ASCE/SEI 41-17 and nonlinear displacement capacities according to displacement-based seismic performance evaluation procedures were analytically investigated. Reinforced concrete square column models were designed to analytically investigate the effects of various design parameters such as concrete grade, transverse reinforcement ratio and axial load levels on the nonlinear displacement and deformation damage limits. According to the results obtained from the nonlinear behaviour relations, the deformation damage limits and plastic rotation properties for the IO, LS and CP performance levels and the force-deformation relations of the designed column models according to different parameters according to ASCE/SEI 41-17 were obtained and compared. The results obtained from the analysis for each section of the whole study were interpreted by comparing them. In the performance evaluation of reinforced concrete structures, the deformation demands, that are taken into consideration as a basis are very important in order to determine the damages of the carrier elements. It has been concluded that the transverse reinforcement ratio and axial load levels have significant effects on the nonlinear behaviour of the reinforced concrete column models, section damage limits and plastic hinge properties, displacement capacities and force-strain relationships.

Betonarme Kare Kolonların Doğrusal Olmayan Yer değiştirme ve Deformasyon Hasar Sınırlarının ASCESEI 41-17'ye göre İncelenmesi

ÖZ

ASCE/SEI 41-17'ye göre betonarme kare kolon modellerinin deformasyona dayalı hasar limitleri, plastik dönme özellikleri ile yer değiştirmeye dayalı sismik performans değerlendirme prosedürlerine göre doğrusal olmayan yer değiştirme kapasiteleri analitik olarak incelenmiştir. Beton sınıfı, enine donatı oranı ve eksenel yük seviyeleri gibi çeşitli tasarım parametrelerinin doğrusal olmayan yer değiştirme ve deformasyon hasar limitleri üzerindeki etkilerini analitik olarak araştırmak için betonarme kare en-kesitli kolon modelleri tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan davranış ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre, Farklı parametrelerde tasarlanan kolon modellerinin ASCE/SEI 41-17'ye göre IO, LS ve CP performans seviyeleri için deformasyon hasar limitleri, plastik dönme özellikleri ve kuvvet-deformasyon ilişkileri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Tüm çalışmanın her bölümü için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Betonarme yapıların performans değerlendirmesinde, esas alınan deformasyon talepleri, taşıyıcı elemanlardaki hasarların belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Enine donatı oranı ve eksenel yük seviyelerinin betonarme kolon modellerinin doğrusal olmayan davranışı, kesit hasar limitleri ve plastik mafsallık özellikleri, yer değiştirme kapasiteleri ve kuvvet-şekil değiştirme ilişkileri üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sismik yük, performans seviyesi, hasar sınırı, deformasyon sınırı

1. Introduction

The ability of reinforced concrete (RC) structural elements to remain under seismic effects without a reduction in load carrying capacity is of vital importance for ensuring life safety performance targets and criteria [1]. RC columns are the main load-bearing members that determine the seismic behavior and performance of framed structures. Performance-based evaluations of RC columns are based on comparison with the displacement capacity and deformation-based damage limits obtained from the nonlinear structural analysis [2]. Due to the damages in the columns after earthquakes in RC structures, objective performance levels of the structures cannot be achieved. Therefore, the behavior of structural elements should be well known for earthquake-resistant building design [3]. RC columns that do not conform with the seismic design and detailing requirements given in current standards and codes carry the risk of non-ductile collapse, which can lead to catastrophic damage and collapse of the structure [4]. The seismic performance of RC structures is of great importance for structures in severe earthquake zones [5]. The seismic performance of RC bearing members greatly affects the total performance of RC structures under seismic effects [6].

Performance is related to the extent to which the capacity of a structure can meet seismic demands [7]. Performance-based design is the design of a structure under the influence of a design earthquake, by predicting a certain structural performance or damage, using deformation-based methods. deformation-based design methods; It takes into account the nonlinear behaviour of the material [8]. One of the most important stages of performance-based methods is to determine the damage levels in structural elements. For this reason, methods based on deformations that are directly related to damage give much more reliable results than those based on force. However, the deformation parameter used to determine the damage is also of great importance [9]. Performance-based earthquake codes express the bending performance of columns with the total rotational capacity of the plastic hinge regions or the plastic rotational capacity [10].

The displacements and deformations in RC columns consist of section damages caused by earthquake effect [11]. Predicting the displacement and deformation capacity of RC columns is very important for a comprehensive performance-based seismic evaluation of new or existing buildings [12]. In order to achieve a more accurate simulation of the real structural behaviour, designers need the accurate nonlinear behaviour of materials (reinforcement and concrete) and moment-curvature relationship for RC members [13].

The purpose of the nonlinear analysis methods to be used to determine the seismic performance of RC buildings under earthquake effects is to calculate the plastic rotation and plastic deformation capacities for ductile behaviour and internal force demands for brittle behaviour of structural elements for a given earthquake. Then, these demand sizes are compared with the deformation and internal force capacities and structural performance evaluation is made at the section and building level. The damage levels of the sections are determined by comparing the deformations calculated with nonlinear calculation methods with the numerical values defined in seismic codes to correspond to the section damage limits. In many seismic codes, some methods have been proposed to determine the earthquake safety of existing buildings [14-15].

The reliability-based analysis and assessment can be performed for different components and elements of RC structures such as beams, columns, and other elements that involve shear stress, etc. [16]. Design codes for RC structures provide minimum criteria and requirements for the design of structures in accordance with the code to ensure the safety of life and property [17]. As the main lateral force and moment resisting members, the ductile displacement and deformation capacity of RC columns is an important parameter for obtaining better seismic performance of structures [18]. Displacement capacity and ductility are parameters that characterize the seismic response of RC structures [19]. Load-bearing elements of structural systems resistant to lateral force and moment should be designed with sufficient strength and ductility [20].

Some research and studies have been carried out to determine the nonlinear displacement and deformation damage limits of RC structural members. Özdemir and Kazaz [1], investigated the deformation limits according to different codes by using the nonlinear finite element method of experimentally tested RC columns. Foroughi and Yüksel [13], investigated the effect of the material model, axial load, longitudinal reinforcement ratio, transverse reinforcement ratio and transverse

reinforcement spacing on the behaviour of RC cross-sections. Foroughi and Yüksel [3], parametric studies were conducted for RC columns and the adequacy of the deformation and damage limit levels given in seismic codes were investigated. Foroughi et al. [14], in order to determine the earthquake performance of structural elements, the deformation-based damage limits for RC elements in codes were analysed analytically. Aydemir et al. [8], a procedure to obtain total limit curvature of RC columns is explained and interaction of the flexural damage limit curvature with various design parameters especially axial load level- are investigated.

In order to determine the seismic performance of the designed square cross-section column models in this study, the deformation-based damage limits and damage regions defined in Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41) [21] were analysed analytically. In addition to the deformation-based damage limits, modelling parameters and numerical acceptance criteria for nonlinear procedures are also calculated for the RC square column models. According to the modelling parameters and numerical acceptance criteria for the RC square column models calculated according to ASCE/SEI 41 [21], generalized force-deformation relation obtained for the column models. For a better understanding and realization of ductile seismic design, it is necessary to estimate the structural deformation capacity under severe earthquakes. In plastic hinge analysis, the total top (peak) displacement of a cantilever column models is obtained as the sum of yield displacement and plastic displacement component. Depending on the curvature values which were obtained from the nonlinear curvature-moment analysis, the peak displacement in the case of yield and pre-collapse and the peak displacement ductility values were obtained of the column models. In the performance evaluation of the RC column models designed within the scope of the study; the performance levels of the column sections were investigated by calculating the plastic rotation properties of the deformation limit values for the Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS) and Collapse Prevention (CP) structural performance levels. The nonlinear behaviour of RC column models were investigated using the stress-strain and moment-curvature relationships obtained based on real material behaviours. Mander concrete model [22] is taken into account in nonlinear moment-curvature analyses of RC column models according to different design parameters. As design parameters in all analyses of RC square cross-section column models; concrete compressive strength, axial load level, transverse reinforcement diameter and transverse reinforcement spacing are taken into account.

2. Structural Performance Levels

Buildings show nonlinear behavior during earthquakes. In order to evaluate this nonlinear behavior, the concept of structural evaluation and design based on the performance criteria related to deformation and displacement has emerged. The ASCE/SEI 41 [21], for seismic evaluation and retrofit of buildings defines target performance levels for different seismic hazard levels, together with modeling procedures and acceptance criteria to assess structural members. Three main performance levels are considered for structural members, namely, Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS) and Collapse Prevention (CP) structural performance levels. IO, is defined as the postearthquake damage state in which a structure remains safe to occupy and essentially retains its preearthquake strength and stiffness. LS, is defined as the post-earthquake damage state in which a structure has damaged components but retains a margin of safety against the onset of partial or total collapse. CP, is defined as the post-earthquake damage state in which a structure has damaged components and continues to support gravity loads but retains no margin against collapse [21].

In ASCE/SEI 41 [21] regulations, acceptance criteria are given according to shear force ratio, axial load ratio, concrete compressive strength, yield strength of confining reinforcement and longitudinal reinforcement ratio. In ASCE/SEI 41 [21], acceptance criteria for RC columns are divided into two according to the splicing condition of the longitudinal reinforcement of the columns. Performance levels due to plastic rotation are given depending on the design parameters a and b values. The deformation, plastic rotation angles and strength ratio parameters in Table 1 are used to establish the significant points in the idealized shear force-chord rotation relation shown in Figure 1. The nonlinear analysis procedures proposed in ASCE/SEI 41 [21] represent the response of RC members classified as deformation-controlled through idealized load-deformation relations. According to ASCE/SEI 41 [21], the governing failure modes of columns strongly affect the force-deformation relation [23]. The generalized force-deformation relation shown in Figure 1 shall be described by the linear response from A (unloaded component) to an effective yield B, then a linear response at reduced stiffness from

point B to C, then the sudden reduction in seismic force resistance to point D, then response at reduced resistance to E, and final loss of resistance thereafter [21].

To determine the deformation capacity of a RC column, ASCE/SEI 41 [21] classifies columns in three different failure modes depending on the plastic shear demand ratio of shear strength at low ductility demand. The shear strength of the RC column (V_{col}) in ASCE/SEI 41 [21] is defined by the Equation (1). In Table 1 and Equation (1), V_{col} is the shear strength, k_{nl} ; a ductility factor. In which $k_{nl} = 1$ for $\mu_\Delta \leq 2$ and $k_{nl} = 0.7$ for $\mu_\Delta > 6$. $\lambda = 1$ for normal-weight aggregate concrete. $\alpha_{col} = 1$ for $s/d \leq 0.75$, $\alpha_{col} = 0$ for $s/d \geq 1$. A_v is the area of transverse reinforcement, $f'_{cL/E}$ and $f_{yTL/E}$ expected concrete strength and yield strength of transverse reinforcement ($f'_{cE} = 1.5f'_c$, $f_{yTE} = 1.25f_{yt}$), d is the effective depth of a columns, s is the transverse reinforcement spacing, ρ_t is the ratio of transverse reinforcement and A_g is the area of the column cross-section. $\lambda = 1$ for normal-weight aggregate concrete. N_{UG} axial force and M_{UD} moment of the column [21].

$$V_{col} = k_{nl}V_{col0} = k_{nl} \left[\alpha_{col} \left(\frac{A_v f_{yTL/E} d}{s} \right) + \lambda \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_{cL/E}}}{M_{UD}/V_{UD} d} \sqrt{1 + \frac{N_{UG}}{0.5 A_g \sqrt{f'_{cL/E}}}} \right) 0.8 A_g \right] (MPa) \quad (1)$$

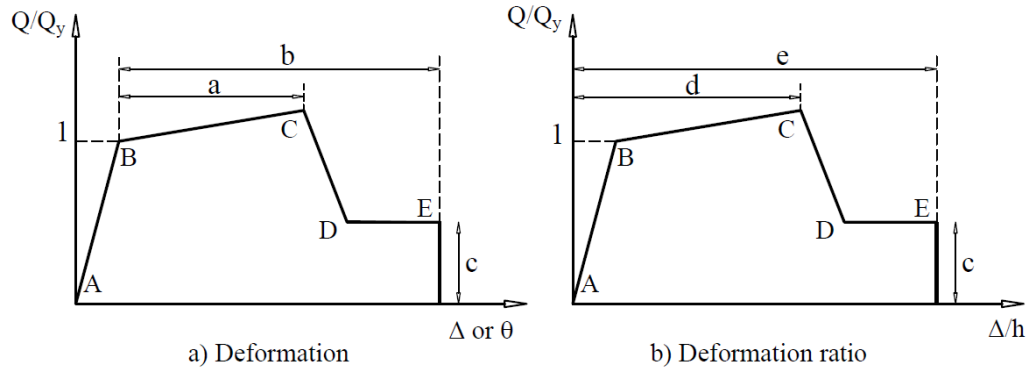


Figure 1. Generalized force-deformation relation for concrete elements or components [21].

Table 1. Modeling parameters and numerical acceptance criteria of RC columns for nonlinear procedures [21]

Modeling Parameters		Acceptance Criteria		
Plastic Rotation Angles, a and b (rad)	Residual Strength Ratio, c	Plastic rotation Angle (Rad)		
		Performance Level		
		IO	LS	CP
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height				
$a = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{col0E}} \right) \geq 0$				
$\text{for } \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \leq 0.5 \left\{ b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} \frac{1}{\rho_t f_{yTE}}} - 0.01 \geq a \right.$				
		$0.15a \leq 0.005$	$0.5b$	$0.7b$
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0$				

3. Nonlinear Displacement in Reinforced Concrete Columns

In order to perform the ductile seismic design of RC structures under strong earthquakes, the structural deformation capacity should be estimated [24]. Performance assessment methods used in the calculation of nonlinear displacement capacity can be calculated using displacement controlled seismic design and plastic hinge method. Extreme loads are used to predict the behavior of plastic hinges subjected to nonlinear deformations. These loads, earthquakes, etc. are important in calculating the maximum displacement capacity of RC structures [25]. The RC columns are exposed to large lateral displacements under high seismic loads in addition to gravity loads, and major damage occurs in the regions where nonlinear deformations occur. Since nonlinear deformations in RC structural members usually occur in the plastic hinge regions, the members must have a major curvature capacity in these regions in order to obtain large lateral displacement capacities. With the development of performance/displacement based seismic design and assessment of RC structures, the deformation capacity of structural members has received great attention.

Plastic hinge method and analysis to determine the seismic behavior of RC columns are still used in displacement-based seismic design and performance evaluation procedures to calculate nonlinear displacement capacities. The lumped plastic rotation (θ_p), along the plastic hinge length (l_p) is then computed as Equation (2). Where ϕ_u ; is the maximum curvature and ϕ_y ; is the yield curvature, as shown in Figure 2. In the plastic hinge analysis, the total peak displacement (Δ_u) of a cantilever column model is obtained as the sum of its yield displacement (Δ_y) and plastic displacement (Δ_p) component (Equation 3). H_w ; is the height of the column section, Δ_y ; yield displacement, Δ_p ; plastic displacement and Δ_u ; total peak displacement. After the calculation of the total peak and yield displacement are calculated, displacement ductility is determined to $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$.

$$\theta_p = \phi_p L_p = (\phi_u - \phi_y) L_p \quad (2)$$

$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y H^2}{3} + \theta_p (H - 0.5 L_p) \quad (3)$$

In this study, the yield curvature (ϕ_y) and ultimate curvature (ϕ_u) in Equation (3) are computed through a moment-curvature analysis using the Mander confined and unconfined concrete model [22]. The ultimate concrete compressive strain (ε_{cu}), corresponds to the value at the moment of first fracture in the transverse reinforcement. The maximum compressive strain in the confined concrete can be calculated from the Equation (4) [26].

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (4)$$

ρ_s ; ratio of transverse confining steel, ε_{su} ; strain in reinforcement at maximum strength and f_{yw} ; yield strength of transverse reinforcement. f'_{cc} ; denotes the compressive strength of confined concrete calculated by Equation (5). In Equation (5), f'_{co} is the unconfined concrete strength and f'_l is the effective lateral confining pressure [22].

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (5)$$

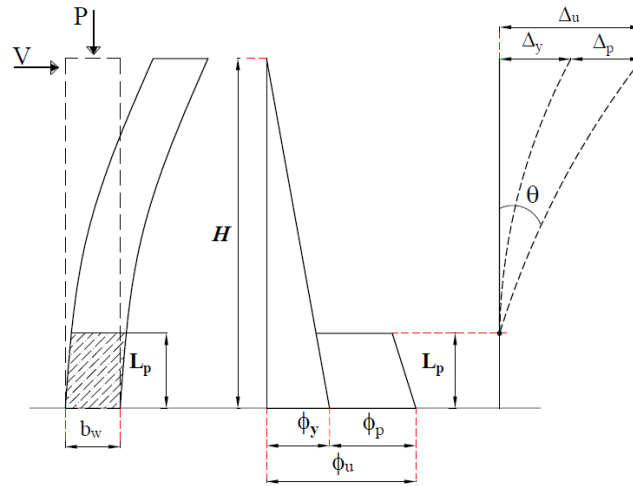


Figure 2. Theoretical model of elastic and plastic displacements in cantilever column

4. Materials and Methods

The deformation-based damage limits of RC square column models according to ASCE/SEI 41 [21] and nonlinear displacement capacities were analytical calculated according to displacement-based seismic design and performance evaluation procedures. For this purpose, square column models with different design parameters were designed. Turkish Building Earthquake Code (TBEC) [27] and Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318) [28] codes were taken into account in the design of square cross-section RC columns. Since this condition is required by the regulations in order to ensure ductile behaviour in RC columns, the limit values given in the regulations were taken into account in this study.

A total of 96 models were designed for different concrete grade, axial loads, transverse reinforcement diameters and spacing of each model. The cross-sectional properties of column models with square cross-section dimensions of 500mm×500mm are given in Figure 3 and Table 2. In order to investigate the effect of transverse reinforcement on the section behaviour of RC square cross-section column models, two different transverse reinforcement diameters (8, 10) and four different transverse reinforcement spacings (50mm, 60mm, 70mm and 80mm) were taken into account. Longitudinal reinforcement is taken as 8Φ20 in column models. For all RC column models, C30, C40 and C50 were chosen as the concrete class and B420C as the reinforcing steel. In the analytical study, the material properties given for concrete and reinforcement in TBDY [27] were used (Figure 4). In Figure 4, f_{co} and f_{cc} unconfined and confined concrete compressive strength, ε_{co} is the strain at maximum stress of unconfined concrete, ε_{cc} is the corresponding strain at maximum concrete stress, ε_{cu} ultimate compression strain of concrete, f_{sy} is the characteristic yield strength of reinforcement, f_{su} is the ultimate strength of reinforcement, ε_{sy} is the yield strain of reinforcement, ε_{sh} is the strain hardening value of reinforcing steel and ε_{su} is the strain in reinforcing steel at ultimate strength.

The minimum total area of transverse reinforcement to be calculated to satisfy the more unfavourable of the requirements are given in Equation (6). A_{sh} and s total area and spacing of transverse reinforcement, b_k cross section dimension of concrete core of column, A_c gross section area of column, A_{ck} concrete core area within outer edges of confinement reinforcement, f_{ck} characteristic standard value of unconfined concrete compressive strength, f_{ywk} characteristic yield strength of transverse reinforcement.

$$\frac{A_{sh}}{sb_k} \geq 0.30 \left[\frac{A_c}{A_{ck}} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \quad (6)$$

$$\frac{A_{sh}}{sb_k} \geq 0.30 \left[\frac{A_c}{A_{ck}} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_{ywk}}$$

Moment-curvature relations of a RC section under normal force and flexural moment depend on axial load levels. Moment-curvature relations for different design parameters were obtained with the SAP2000 [29] program by considering the nonlinear behaviour of the RC columns and the nonlinear

behaviour of the materials. The moment-curvature relationships for different axial load levels of the column cross-sections were obtained considering mender concrete model [22]. The combined effect of vertical and earthquake loads (N_{dm}), gross section area of RC column shall satisfy the condition $A_c \geq N_{dmax}/0.40f_{ck}$ [27]. To investigate the effect of axial load on the nonlinear behaviour of the RC column, models were investigated under four different axial forces ($N_1=480\text{kN}$, $N_2=960\text{kN}$, $N_3=1440\text{kN}$ and $N_4=1920\text{kN}$).

According to the plastic hinge length, the yield displacement (Δ_y) and plastic displacement (Δ_p) values of the RC columns were calculated and the total peak displacement (Δ_u) values of the RC columns were obtained. Displacement ductility (μ_Δ) is related to a structural system or member configuration and its section ductility and is based on the load-displacement curve.

Several key factors that are considered in ASCE/SEI 41 [21] to affect the nonlinear force-deformation behaviour of RC columns are examined, which include the governing failure mode, axial load levels, concrete compressive strength, transverse reinforcement diameter and spacing. Also, the ASCE/SEI 41 [21] procedures to determine the force-deformation relations of RC column models are reviewed. Modelling parameters and numerical acceptance criteria given in ASCE/SEI 41 [21] were taken into consideration in order to investigate the effect of the force-deformation relations in the designed RC column models.

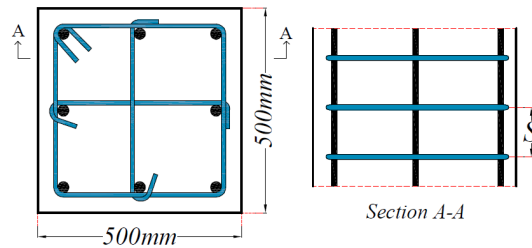


Figure 3. Cross-section of RC column models

Table 2. Designed column section details

Longitudinal reinforcement	Material (MPa)	Transverse reinforcement	Axial Load
8Φ20 mm	C30 C40 C50	Φ10/50 mm	0.10 0.20 0.30 0.40
		Φ10/60 mm	
		Φ10/70 mm	
		Φ10/80 mm	
		Φ12/50 mm	
		Φ12/60 mm	
		Φ12/70 mm Φ12/80 mm	

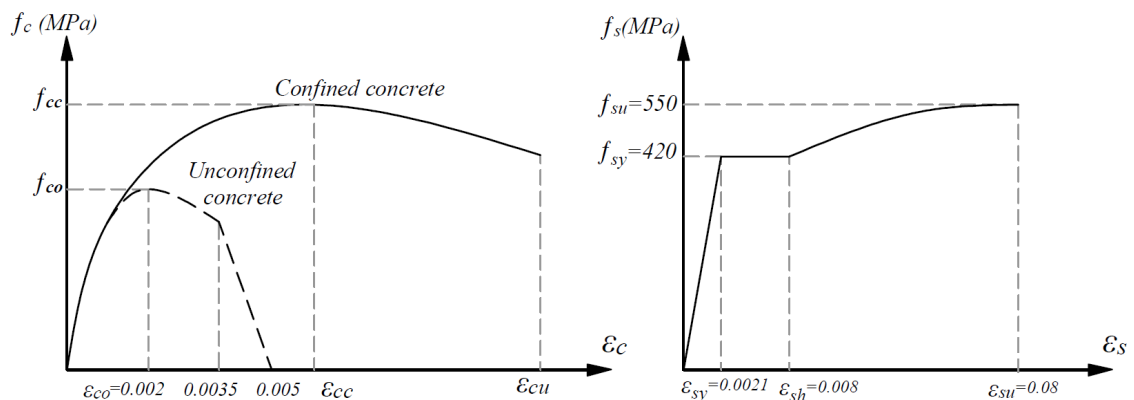


Figure 4. Stress-strain relationship for materials [27]

5. Research Findings and Discussion

RC columns are the most important structural members that determine the ductility of the structures. The main design parameters affecting the behavior of RC column models are axial load level, concrete compressive strength, and transverse reinforcement ratios. The tip displacement of a cantilever columns is obtained as the sum of its Δ_y and Δ_p . Δ_y , Δ_p , Δ_u and μ_Δ values of the elements were calculated for different axial load levels according to the calculated by plastic hinge length in RC column sections (Table 3-4). The results of the calculations are summarized in Figure 5 respectively according to different parameters. In calculating the total displacement of the RC columns, the yield and maximum curvature values were obtained from the moment-curvature relationships which take into account the section height, plastic hinge length and nonlinear behavior are taken into consideration. The plastic hinge length (L_p) shall be taken as half of the section length in the active direction ($L_p = 0,50h$).

The load-deformation relations of the designed column models according to different parameters were obtained according to the modeling parameters given in the ASCE/SEI 41 [21] standard. Performance level values of non-linear procedures of RC square columns according to different transverse reinforcement diameters, transverse reinforcement spacing and concrete compressive strength were calculated. The calculated performance level values are given in Tables 5, 6 and 7, respectively, according to different design parameters. Plastic rotation values calculated for different performance levels according to different design parameters are given Figure 6. For the nonlinear procedure defined in ASCE/SEI 41 [21], the load-deformation relationships of RC square columns or the curves describing the behavior under the effect of monotonically increasing deformation are given in Figure 7, respectively, according to different design parameters. As shown in Figure 7, the modeling parameter provides the plastic rotation at significant loss of lateral force capacity.

Table 3. Δ_y , Δ_p , Δ_u and μ_Δ values calculated according to different concrete grade

N/N_{max}	Transverse Reinforcement	ρ_s	Material	Δ_y (mm)	Δ_p (mm)	Δ_u (mm)	μ_Δ
0.1	$\Phi 12/50\text{mm}$	0.031	30	30.2	240.8	271	8.97
			40	30.2	195.4	225.6	7.47
			50	30.2	170	200.2	6.63
0.2			30	35.1	173.2	208.3	5.93
			40	35.1	133.7	168.8	4.81
			50	35.5	111.9	147.4	4.15
0.3			30	40.0	123.7	163.7	4.09
			40	41.2	99.4	140.6	3.41
			50	42.1	83.3	125.4	2.98
0.4			30	45.5	101.9	147.4	3.24
			40	47.1	75.3	122.4	2.60
			50	48.15	61.65	109.8	2.28

Table 4. Δ_y , Δ_p , Δ_u and μ_Δ values calculated according to different transverse reinforcement ratio

Material	Transverse Reinforcement	ρ_s	N/N_{max}	Δ_y (mm)	Δ_p (mm)	Δ_u (mm)	μ_Δ
C30	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.0214	0.1	30.2	221.4	251.6	8.33
			0.2	35.4	163.7	199.1	5.62
			0.3	40.6	137.8	178.4	4.39
			0.4	47.5	119.8	167.3	3.52
	$\Phi 12/50\text{mm}$	0.031	0.1	30.2	241.3	271.5	8.99
			0.2	35.1	188.5	223.6	6.37
			0.3	40.0	180.0	220.0	5.50
			0.4	46.0	170.1	216.1	4.70
	$\Phi 12/60\text{mm}$	0.0258	0.1	30.2	232.5	262.7	8.70
			0.2	35.2	181.8	217.0	6.16
			0.3	40.2	167.9	208.1	5.18
			0.4	46.5	153.6	200.1	4.30
	$\Phi 12/70\text{mm}$	0.0221	0.1	30.2	227.4	257.6	8.53
			0.2	35.3	173.2	208.5	5.91
			0.3	40.4	153.5	193.9	4.80
			0.4	47.0	132.4	179.4	3.82
	$\Phi 12/80\text{mm}$	0.0194	0.1	30.2	215.9	246.1	8.15
			0.2	35.6	154.3	189.9	5.33
			0.3	40.8	123.9	164.7	4.04
			0.4	48.0	103.7	151.7	3.16

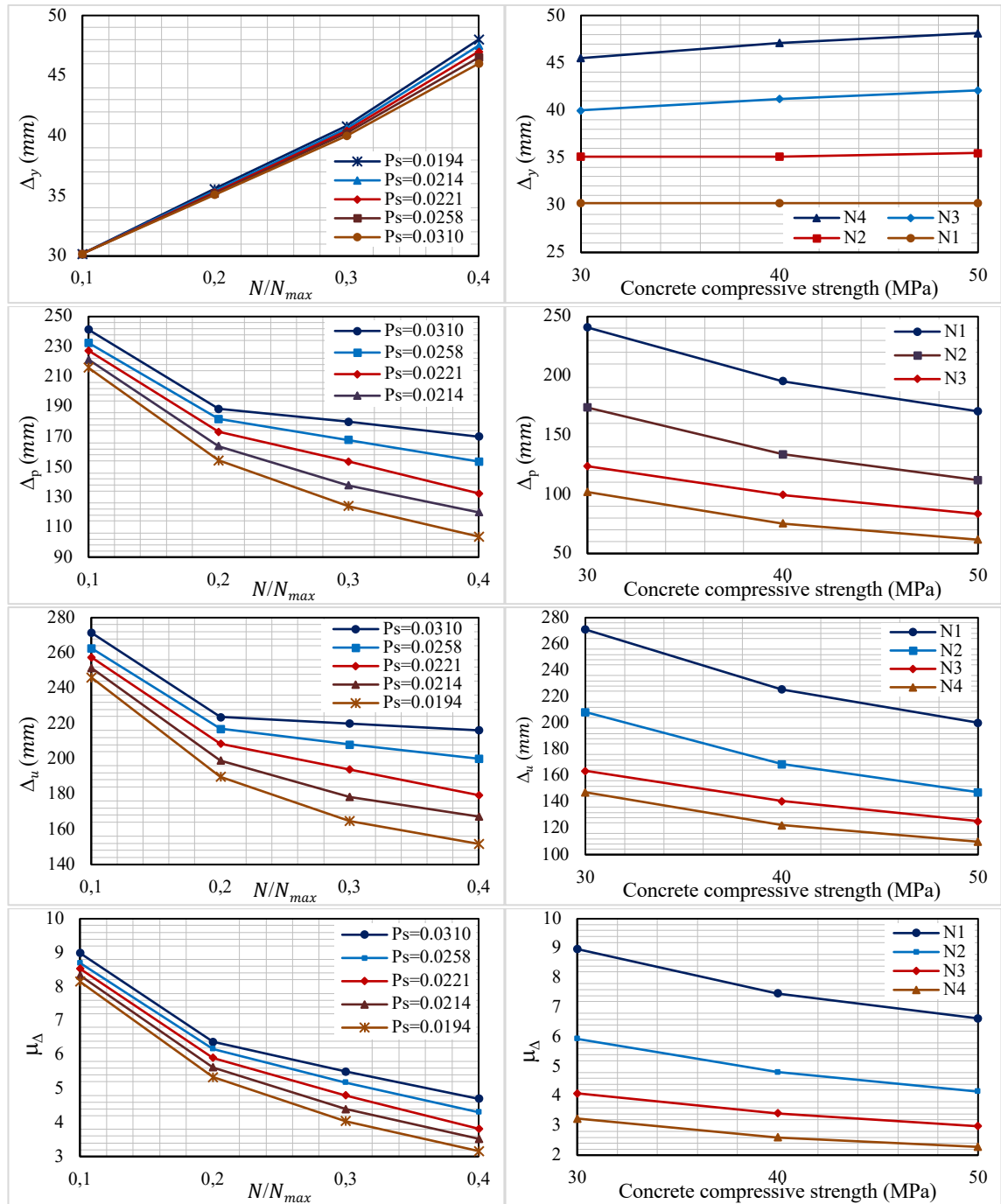


Figure 5. Influence of different parameters on the total peak displacement and displacement ductility

Table 5. Performance level values of RC square columns for different transverse reinforcement diameters

Material	Transverse Reinforcement	ρ_s	N/N_{max}	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
				Plastic rotation Angle (Radians)			Performance Level		
				a	b	c	IO	LS	CP
C30	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.0214	0.10	0.042	0.078	0.213	0.0062	0.0391	0.0548
			0.20	0.037	0.069	0.187	0.0056	0.0345	0.0482
			0.30	0.034	0.061	0.160	0.0051	0.0307	0.0430
			0.40	0.031	0.055	0.133	0.0047	0.0276	0.0386
	$\Phi 12/50\text{mm}$	0.0310	0.10	0.046	0.082	0.213	0.0069	0.0408	0.0571
			0.20	0.042	0.074	0.187	0.0063	0.0372	0.0521
			0.30	0.038	0.068	0.160	0.0057	0.0342	0.0478
			0.40	0.035	0.063	0.133	0.0053	0.0315	0.0441

Table 6. Performance level values of RC square columns for different transverse reinforcement spacings

Material	Transverse Reinforcement	ρ_s	N/N_{max}	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
				Plastic rotation Angle (Radians)			Performance Level		
				a	b	c	IO	LS	CP
C30	$\Phi 12/60\text{mm}$	0.0258	0.10	0.044	0.080	0.213	0.0065	0.0400	0.0560
			0.20	0.040	0.072	0.187	0.0059	0.0359	0.0503
			0.30	0.036	0.065	0.160	0.0054	0.0325	0.0455
			0.40	0.033	0.059	0.133	0.0050	0.0297	0.0415
	$\Phi 12/70\text{mm}$	0.0221	0.10	0.042	0.079	0.213	0.0063	0.0393	0.0550
			0.20	0.038	0.069	0.187	0.0057	0.0347	0.0486
			0.30	0.034	0.062	0.160	0.0051	0.0310	0.0435
			0.40	0.032	0.056	0.133	0.0047	0.0280	0.0392
	$\Phi 12/80\text{mm}$	0.0194	0.10	0.040	0.077	0.213	0.0061	0.0386	0.0540
			0.20	0.036	0.067	0.187	0.0054	0.0336	0.0470
			0.30	0.033	0.059	0.160	0.0050	0.0297	0.0415
			0.40	0.030	0.053	0.133	0.0046	0.0264	0.0370

Table 7. Performance level values of RC square columns for different concrete compressive strength

Material	Transverse Reinforcement	ρ_s	N/N_{max}	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
				Plastic rotation Angle (Radians)					
				a	b	c	Performance Level		
							IO	LS	CP
C40	$\Phi 12/50\text{mm}$	0.0310	0.10	0.046	0.079	0.213	0.0068	0.0395	0.0553
			0.20	0.042	0.070	0.187	0.0063	0.0351	0.0492
			0.30	0.038	0.063	0.160	0.0057	0.0315	0.0441
			0.40	0.035	0.057	0.133	0.0053	0.0285	0.0399
C50			0.10	0.046	0.077	0.213	0.0068	0.0383	0.0537
			0.20	0.042	0.066	0.187	0.0063	0.0332	0.0465
			0.30	0.039	0.058	0.160	0.0058	0.0292	0.0409
			0.40	0.036	0.052	0.133	0.0053	0.0260	0.0364

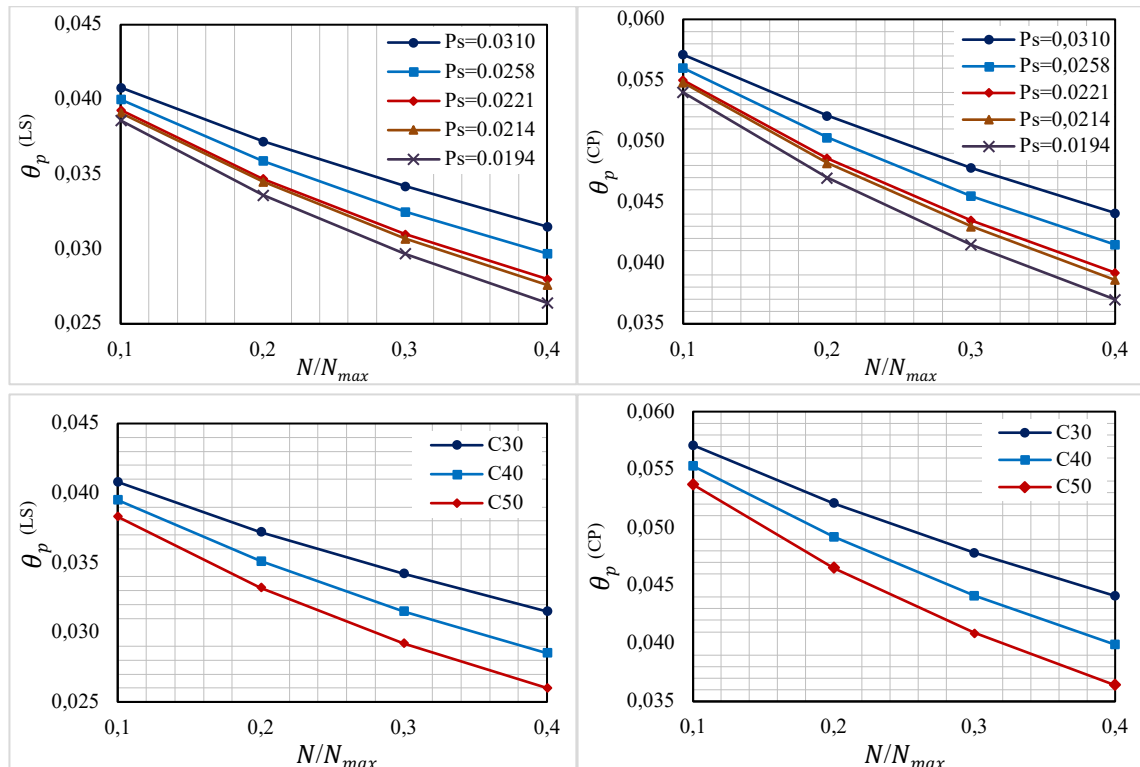


Figure 6. Plastic rotation values calculated for different performance levels according to different design parameters

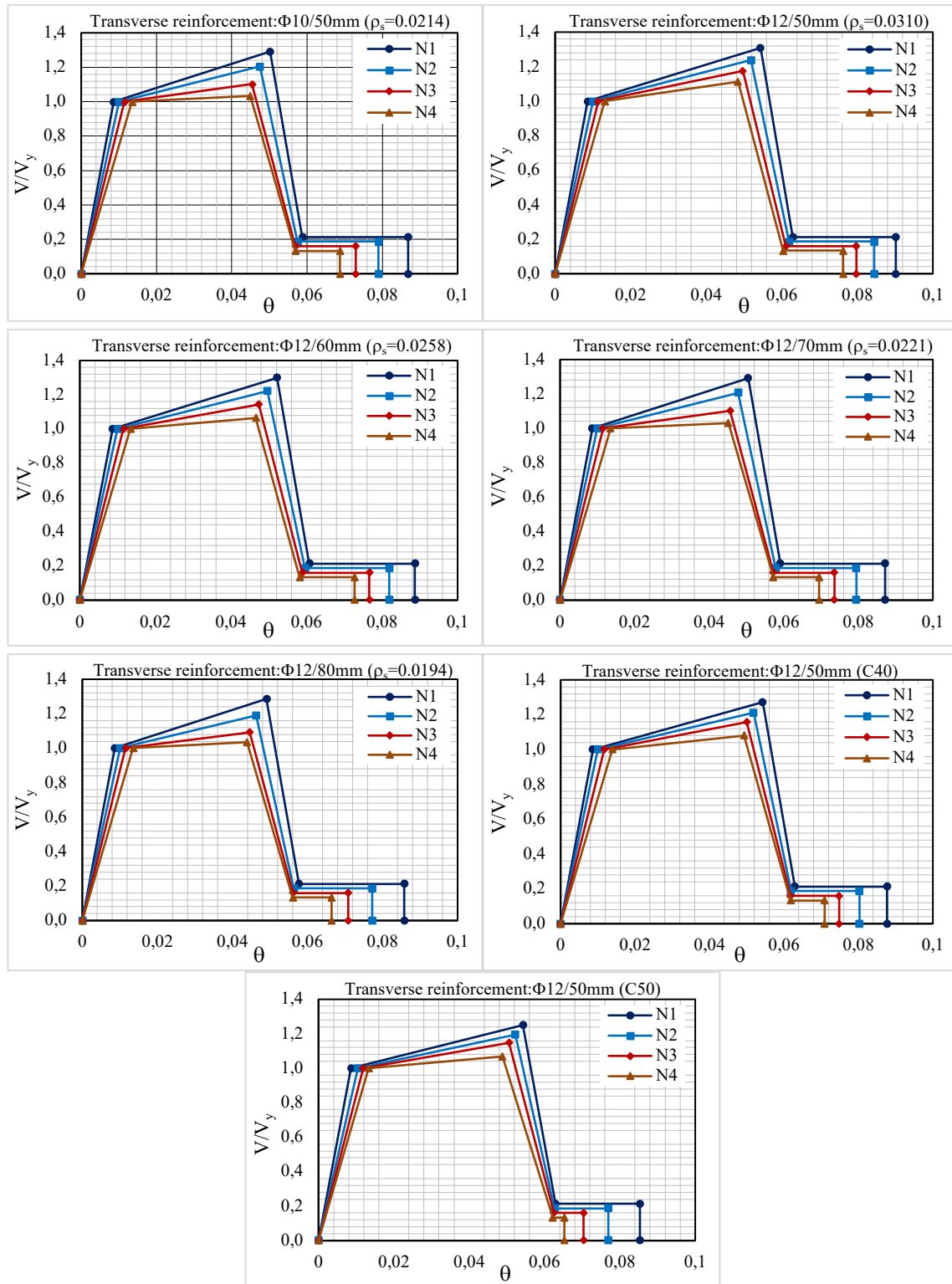


Figure 7. Force–deformation relation for RC square columns according to different design parameters.

6. Conclusion

The ratio of transverse reinforcement is an effective parameter on the nonlinear behaviour of RC columns. The transverse reinforcement ratios have an important effect on the bearing capacity and ductility of the RC columns. In the displacement-controlled seismic design and plastic hinge analysis, the Δ_u of a cantilever column is obtained as the sum of its Δ_y and Δ_p component. There are differences in the values of ϕ_y and ϕ_u values in addition Δ_y , Δ_p , Δ_u and μ_Δ values calculated according to different axial load levels. Δ_y value increases, Δ_p , Δ_u and μ_Δ value decreases with increasing axial load level. The

value of μ_{Δ} decreases with increasing Δ_y values and decreasing of Δ_u values. There are differences in the calculated Δ_y , Δ_p , Δ_u and μ_{Δ} values according to ϕ_y , ϕ_u values and different axial load levels. According to different axial load levels, different Δ_u and μ_{Δ} values are natural result.

In the present study, the parameters affecting damage limits for RC square columns according to the deformation and rotation limits of the various codes were investigated. The following results were obtained from the code-based seismic performance assessment procedures in the square columns. One of the most important steps in the deformation-based seismic design and performance evaluation procedures according to the ASCE/SEI 41, 2017 is to determine the performance damage levels of CP, LS, and IO in the structural elements. From the load-deformation relations obtained for the column models; the V/V_y ratios increase with the increase of transverse reinforcement ratio (concrete compressive strength and axial load levels are constant). For the constant transverse reinforcement ratio and concrete compressive strength, V/V_y ratios decrease with increasing axial load levels. For the constant transverse reinforcement ratio and axial load levels, V/V_y ratios decrease with increasing compressive strength of concrete. The deformation ratio (θ) of the column models increases with the increase of transverse reinforcement ratio and concrete compressive strength.

Deformation ratio decreases with increasing axial load levels. IO values according to different parameters was obtained as a constant value of 0.005. LS and CP performance level damage values increase with increasing transverse reinforcement ratio and these performance damage values decrease with increasing axial load levels. The increase in concrete compressive strength remains constant with the modelling parameters calculated at the LS and CP performance levels in ASCE/SEI 41, 2017. However, the modelling parameters calculated for these performance levels decrease with increasing axial load level and transverse reinforcement spacing. Modelling parameters values increase with increasing transverse reinforcement diameter. It significantly reduces the damage limitations of the increase in the axial load levels. In the case of increasing axial load levels, plastic rotation values decrease for LS and CP performance levels. Plastic rotation values for LS and CP performance levels decrease when axial load levels increase for constant transverse reinforcement ratio and concrete compressive strength. With the increase of the transverse reinforcement ratio for the constant axial load level and the concrete compressive strength, the plastic rotation values for the LS (CD) and CP performance levels increase. As the axial load levels increase in RC column models, the damage limit values and plastic rotation values calculated for different performance levels decrease. At these axial load levels, it is seen from the analysis results that the transverse reinforcement ratio is more important in the performance levels of the sections and the modelling parameters and acceptance criteria stipulated in the regulation are quite effective.

Acknowledgment

The authors thank the Scientific Research Projects Coordination Office of Konya Technical University for supporting this study with project number 211104011.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] M. A. Özdemir and İ. Kazaz, "Evaluation of Deformation Limits in Codes for Reinforced Concrete Columns," *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences*, vol. 6, pp. 225-233, 2018. doi:10.20290/aubtdb.489023
- [2] T. Solmaz, "Evaluation of Performance Based Displacement Limits for Reinforced Concrete Columns Under Flexure" M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2010.
- [3] S. Foroughi and S. B. Yüksel, "Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Column," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 11, no. 2, pp. 584-601, 2019. doi:10.29137/umagd.519208
- [4] M. Jalalpour and T. Alkhrdaji, "Backbone Curves of FRP Confined Concrete Columns for Nonlinear Analysis," In *10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. CICE 2021, Lecture Notes in Civil Engineering, vol 198. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-88166-5_109

- [5] L. Hou, R. Xu, D. Chen, S. Xu, F. Aslani, "Seismic Behavior of Reinforced Engineered Cementitious Composite Members and Reinforced Concrete/Engineered Cementitious Composite Members: A Review," *Structural Concrete*, vol. 21, no. 1, pp. 199-219, 2020. doi:10.1002/suco.201800269
- [6] L. Xiao-chun and H. Xiao-lei, "Performance Index Limits of High Reinforced Concrete Shear Wall Components" *Journal of the Central South University of Technology*, vol. 18, pp. 1248-1255, 2011. doi:10.1007/s11771-011-0829-9
- [7] Ö. Çavdar, E. Bayraktar ve A. Çavdar, "Mevcut Perdeli Betonarme Bir Yapının doğrusal Olmayan Yöntemle deprem Performansının Belirlenmesi," *International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015)*, 7-9 May 2015, Burdur, Türkiye [Online]. Available: <http://ees2015.mehmetakif.edu.tr> -<http://ees2015.maku.edu.tr>. [Erişim tarihi: 10 Nisan 2021].
- [8] C. Aydemir, M. S. Kırçıl, B. Hancıoğlu ve M. Zorbozan, "Betonarme Kolonların Hasar Sınır Eğriliklerinin Belirlenmesi," *İMO Teknik Dergi*, cilt 22, sayı 109, ss. 5613-5642, 2011.
- [9] U. Hasgöl, A. Yavaş, K. Türker, M. Terzi ve T. Birol, "DBYBHY-2007'de Tanımlanan Hasar Kriterlerinin Betonarme Kolon Elemanlar İçin İncelenmesi," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, cilt 21, sayı 2, pp. 499-514, 2016. doi:10.17482/uumfd.285488
- [10] B. Acun ve H. Sucuoğlu, "Betonarme Kolonların Şekildeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel Gözlemlerle Değerlendirilmesi," *İMO Teknik Dergi*, cilt 22, sayı 108, pp. 5523-5541, 2011.
- [11] S. Cansız, C. Aydemir and G. Arslan, "Comparison of displacement capacity of reinforced concrete columns with seismic codes," *Advances in Concrete Construction*, vol. 8, no. 4, pp. 295-304, 2019. doi:10.12989/ACC.2019.8.4.295
- [12] M. A. Özdemir, İ. Kazaz and S. G. Özkaya, "Evaluation and Comparison of Ultimate Deformation Limits for Reinforced Concrete Columns," *Engineering Structures*, vol. 153, pp. 569-581, 2017. doi:10.1016/j.engstruct.2017.10.050
- [13] S. Foroughi and S. B. Yüksel, "Investigation of the Moment-Curvature Relationship for Reinforced Concrete Square Columns" *Turkish Journal of Engineering (TJUE)*, vol. 4, no. 1, pp. 36-46, 2020. doi:10.31127/tuje.571598.
- [14] S. Foroughi, R. Jamal and S. B. Yüksel, "Effect of Confining Reinforcement and Axial Load In Determining Deformation Based Damage Limits," *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 8, no. 4, pp. 1042-1052, 2020a. doi:10.21923/jesd.752531.
- [15] S. Foroughi and S. B. Yüksel, "Deformation Based Damage Limits of the Ductile Reinforced Concrete Shear Walls," *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 244-255, 2021. doi:10.28979/jarnas.845418
- [16] Z. I. Sakka, I. A. Assakkafa and J. S. Qazweenib, "Reliability Based Assessment of Damaged Concrete Buildings," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 65, no. 6, pp. 751-760, 2018. doi:10.12989/sem.2018.65.6.751
- [17] H. Jiang, X. Lu and J. Zhu, "Performance-Based Seismic Analysis and Design of Code-Exceeding Tall Buildings in Mainland China," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 43, no. 4, pp. 545-460, 2012. doi:10.12989/sem.2012.43.4.545
- [18] X. C. Chen, Z. Z. Bai and F. T. K. Au, "Effect of Confinement on Flexural Ductility Design of Concrete Beams," *Computers and Concrete*, vol. 20, no. 2, pp. 129-143, 2017. doi:10.12989/cac.2017.20.2.129
- [19] J. C. V. Perez, J. Carlos and M. M. Mulder, "Improved Procedure for Determining the Ductility of Buildings under Seismic Loads," *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, vol. 34, no. 1, pp. 1-8, 2018. doi:10.23967/j.rimni.2018.03.001
- [20] S. B. Yüksel and S. Foroughi, "Analytical Investigation of Confined and Unconfined Concrete Strength of Reinforced Concrete Columns," *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol. 7 no. 3, pp. 611-629, 2019. doi:10.36306/konjes.613880
- [21] ASCE Standard-41, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, (ASCE/SEI 41-17), Published by the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2017. [E-book]. Available: <https://searchworks.stanford.edu/view/12367863>
- [22] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826, 1988. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- [23] İ. Kazaz, P. Gülkan and A. Yakut, "Performance limits for structural walls: An analytical perspective," *Engineering Structures*, vol. 43, pp. 105-119, 2012. doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.011
- [24] S. Foroughi and S. B. Yüksel, "Investigation of Deformation-Based Damage Limits of RC Columns for Different Seismic Codes," *Journal of Engineering Research (JER)*, Online First Articles, 2021. doi:10.36909/jer.13835
- [25] A. Moshfeghi, "A New Model for Plastic Hinge Length of RC Columns and Evaluation of Seismic Assessment Documents," M.Sc. Thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye, 2015.
- [26] T. Paulay and M. J. N. Priestley, "Stability of ductile structural walls," *ACI Structure Journal*, vol. 90, no. 4, pp. 385-392, 1993.
- [27] TBEC, Specifications for Building Design Under Earthquake Effects, Turkish Building Earthquake Code, Ministry of Public Works and Housing, 18 March 2018, Ankara. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>. [Accessed: Feb. 12, 2021].

[28] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, USA, 2014. [Online]. Available: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U14&Language=English>. [Accessed: Feb. 12, 2021]

[29] SAP2000, v 20.1.0, Integrated Solution for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, USA, 2018.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Smart City Analysis with ANP and PROMETHEE Methods: A Case in Ankara

Senanur Yaşar^a, Zümra Poyraz^b, Rabia Yumuşak^c, Tamer Eren^{*d}

Submitted: 16.06.2021 Revised: 25.01.2022 Accepted: 07.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.02

ABSTRACT

Keywords: Smart city, MCDM, ANP, PROMETHEE, Ankara

^a Kırıkkale University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Industrial Engineering
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8773-4063

^b Kırıkkale University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Industrial Engineering
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4742-2134

^c Kırıkkale University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Industrial Engineering
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0257-939X

^d Kırıkkale University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Industrial Engineering
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5282-3138

*Corresponding author:
tamereren@gmail.com

Anahtar Kelimeler: Akıllı şehir,
ÇKKV, ANP, PROMETHEE,
Ankara

Smart cities, with elements created using technology, enable citizens to improve their living standards and create sustainable settlements. Sustainability of the main system within the city is aimed by increasing the performance of sub-systems such as energy, communication, transportation, health, education and public services. It directly serves the purposes of using the resources efficiently by transforming the settlements into smart city system, keeping the environmental damage to a minimum by optimizing recycling practices and maximizing the level of social welfare. In this context, in this study, the city of Ankara, which maintains its importance as the capital city, has been evaluated in terms of smart city applications. In the application, 7 districts were handled and their transformation into a smart city system was investigated. Considering the multi-criteria nature of the problem, the Analytical Network Process (ANP) and PROMETHEE method, which are among the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, are integrated in the proposed model. However, this study contributes to the literature in terms of the method used in the proposed model for the problem. In addition, as a result of the study, it has been determined that Çankaya district is the most developed district in terms of smart city applications.

ANP ve PROMETHEE Yöntemleri ile Akıllı Şehir Analizi: Ankara’da Bir Uygulama

ÖZ

Akıllı şehirler, teknoloji kullanılarak oluşturulmuş unsurlarla vatandaşların hayat standartlarını daha iyi bir seviyeye çıkarmayı ve sürdürülebilir yerleşim yerleri oluşturmayı sağlamaktadır. Enerji, haberleşme, ulaştırma, sağlık, eğitim ve kamu hizmetleri gibi alt sistemlerin performansında artış sağlayarak şehir kapsamındaki ana sistemin sürdürülebilirliği amaçlanmaktadır. Yerleşim yerlerinin akıllı şehir sistemine dönüştürülmesi ile kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, geri dönüşüm uygulamalarının optimize edilerek çevreye verilen zararı minimum seviyede tutulması ve toplumsal refah seviyesinin maksimize edilmesi amaçlarına doğrudan hizmet etmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada başkent olması ile önemini koruyan Ankara ili akıllı şehir uygulamaları açısından değerlendirilmiştir. Yapılan uygulamada 7 ilçe ele alınmış olup ilçelerin akıllı şehir sistemine dönüşümleri araştırılmıştır. Bu çalışma ele alınan 7 ilçenin akıllı şehir sistemine dönüşüm sürecinde kılavuz niteliği taşıdığı için büyük önem arz etmektedir. Problemin çok kriterli yapısı dikkate alınarak önerilen modelde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan Analitik Ağ Süreci (ANP) ve PROMETHEE yöntemi entegre edilmiştir. Bununla birlikte bu çalışma probleme önerilen model kapsamında kullanılan yöntem açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışma sonucunda Çankaya ilçesinin akıllı şehir uygulamaları açısından en gelişmiş ilçe olduğu tespit edilmiştir.

1. Giriş (Introduction)

Dünya nüfusu her geçen gün daha da artmaktadır. Artan bu nüfusun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamaktadır. Aynı zamanda artan nüfus ve teknoloji ile birlikte kentsel bölgelere göç git gide artmıştır. Artan bu nüfus ile birlikte kentlerdeki yerleşmeler, enerji, su, eğitim, hizmet, sağlık, altyapı ve güvenlik gibi konularda sorunlar oluşmaktadır. Bu sorunlar; plansız kentleşme, atıklar için geri dönüşüm yöntemlerinin uygulamaya alınmaması, hava ve su kirliliği, yoğun trafik ve kazalar, vatandaşlar arasında yoksulluğun artması, suç oranının artması, kaynaklara erişim sıkıntısı gibi sıralanmaktadır. Ortaya çıkan bu problemlere "akıllı" çözümler getirmek adına akıllı şehir yaklaşımı ortaya çıkmıştır. Bu akıllı şehir yaklaşımıyla birlikte kaynakların optimum şekilde kullanılması sonucunda yüksek yaşam kalitesi sağlanmaktadır [1].

Akıllı şehir kavramı, teknolojinin şehir sorunlarına çözüm getirmede kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu durumda akıllı şehir kavramı teknolojinin varlığı sayesinde gelişmektedir. Akıllı şehirlerin ilgilendiği öncelikli konular hareketlilik, enerji, su ve gıda hizmeti, eğitim ve sağlıktır. Akıllı şehir kavramının birden fazla işlevi ve tanımı vardır. Çeşitli konular ile bilgi iletişim teknolojileri entegre edilerek hayatı kolaylaştırıp insanların refah düzeyi yüksek bir ortamda yaşaması ve gelecekte de ihtiyaçlarını etkin bir şekilde karşılanması adına şehirlerin akıllı şehir haline gelmesi gerekmektedir.

Akıllı ve sürdürülebilir şehirlerin performansını ölçmek zor bir problemdir. Özellikle son yıllarda birçok araştırmacı, kentsel akıllılık ve sürdürülebilirliğin boyutlarını değerlendirmek için göstergelere dayalı yöntemleri uygulamıştır. Ayrıca bu yöntemleri kullanarak bu boyutları bir araya getirmeye ve küresel şehirleri kıyaslamaya çalışmışlardır. Bu çalışmalar, gösterge sayısı yirmi ile seksen arasında değişen akıllı ve sürdürülebilir şehrin birçok özelliği ile farklı ağırlıklandırma yöntemleri kullanarak birçok küresel şehri karşılaştırmaya çalışmaktadır [2]. Bu çalışmada ele alınan ilçelerin akıllı ve sürdürülebilir özelliklerini analiz etmek, akıllı ve sürdürülebilir şehir planlaması sırasında yatırım yapılması ve geliştirilmesi gereken alanlar hakkında fikir vermek amacıyla hazırlanmıştır. Ayrıca ilçe veya il yöneticilerinin akıllı şehirlerin boyutlarının önceliklerini (ağırlıklarını) kullanarak birbirleriyle karşılaştırma yapmaları ve böylece kıyaslama fırsatlarını görmeleri beklenmektedir. Bununla birlikte, değerlendirilen 7 ilçenin yöneticileri, ilçelerin karşılaştırma sonuçlarından yararlanarak iyileştirilmesi gereken alanları görmeleri beklenmektedir.

Akıllı şehirlere geçişte yenilikçi bir yaklaşım gerekmektedir ve akıllı şehir kapsamında öncelikli olarak üst yönetimin sorumluluğu oldukça büyüktür. Şehirde neler eksik olduğunu, neler yapılabileceğine, hangi sorunlara nasıl çözüm bulunabileceği adına yenilikçi çalışmalar yapılmalıdır ve yapılan çalışmalar sonucu halk bilinçlendirilmeli ve yapılan çalışmanın sürdürülebilirliği sağlanmalıdır [3]. Bu sebepten dolayı bu çalışmada Türkiye'nin başkenti olan ve büyük bir nüfusa sahip olan Ankara'da akıllı kent uygulamaları analiz edilmiştir. Analiz için Altındağ, Keçiören, Yenimahalle, Mamak, Çankaya, Etimesgut, Sincan olmak üzere 7 ilçe incelenmiş olup ÇKKV yöntemlerinden ANP ve PROMETHEE kullanılmıştır. İlk olarak ilçelerin akıllı şehir seviyesini etkileyen kriterler ANP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Hesaplanan kriter ağırlıkları PROMETHEE yönteminde kullanılmıştır ve 7 ilçenin akıllılık seviyesi ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda önerilen modelde kullanılan yöntem entegrasyonu ve uygulama alanı açısından literatüre katkı sağlamıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde akıllı şehir kavramı hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise akıllı şehir konusu hakkında yapılan literatür araştırması yer almaktadır. Dördüncü bölümde kullanılan yöntemler yer almış olup ANP ve PROMETHEE yöntemi anlatılmıştır. Beşinci bölümde çalışmanın uygulama kısmına yer verilmiştir. Bu bölümde problem için gerekli alternatifler ve kriterler açıklanmış olup ANP ve PROMETHEE yöntemleriyle yapılan çözüm yer almıştır. Altıncı bölümde sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Akıllı Şehir (Smart City)

Akıllı kent kavramı, giderek artan teknolojinin şehir sorunlarına çözüm sağlayacak şekilde kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. [4]. Yapılan akıllı kent tanımlarının her birinin konunun farklı yönlerine vurgu yaptığını ve farklı bakış açılarıyla konuyu ele aldığı görülmektedir. Ancak akıllı kent kavramı üzerine yapılan tanımların, kentler için gerekli teknolojik imkânların her geçen gün değişmesi

ve gelişmesi ile sürekli farklılaştığı unutulmamalıdır. [5]. Akıllı kent, kentsel hizmetlerin sunumunda bilgi teknolojilerinin kullanıldığı katılımcılığın teknoloji ile sağlandığı yenilikleri takip eden aktif biçimde öğrenen birey ve kurumların yer aldığı çevreci bir kenti ifade etmektedir [6].

Akıllı kent, enerji, ulaşım ve kamu hizmetleri vb. gibi konularda şehrin hizmet performansının kalitesini arttırmak, kaynak tüketimini korumak, israfı önlemek gibi birçok konularda bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak oluşturulan şehre verilen isimdir. Akıllı şehir kavramındaki asıl amaç teknolojiyi kullanarak vatandaşların yaşam kalitesini arttıracak, sorunlarına kolayca çözüm bulacak ve bunların sonuçlarında daha sürdürülebilir şehir oluşturmaktır [3]. Akıllı şehirlerde birçok akıllı uygulamalar bulunmaktadır ve bu akıllı uygulamalar birçok alanda yapılmaktadır. Örneğin; Hava kalitesi, sensörler yardımıyla izlenir ve olası durumlar için önlemler alınır. Mobil uygulamalar yardımıyla birçok kamu işleri belediyelere gitmeye gerek kalmadan yapılmaktadır. Akıllı aydınlatmalar yardımıyla enerji tüketimi azaltılmakla birlikte çevreye verilen zarar minimum seviyede tutulmaktadır. Ulaşım konusunda birçok akıllı faaliyetler vardır. Bu akıllı faaliyetlerle trafik sıkışıklığı ve kazalar önlenmektedir. Emniyet ve güvenlik konusunda olası durumlara hızlı çözümler sunulmaktadır. Atık yönetimi, akıllı geri dönüşüm ile düzgün yapılmaktadır ve çöp kutularına sensörler koyarak doluluk düzeyi anlaşılabilmektedir. Uygun fiyatlı alt yapı sağlanabilir. Sürdürülebilir ve ekolojik yönden kaynaklar etkin kullanılarak karbon ayak izi azaltılır. Akıllı durak yardımıyla hangi aracın ne kadar süre sonra geleceği gibi bilgiler vatandaş ile paylaşılır. Ücretsiz Wi-Fi alanları oluşturulabilir. Şehirlerde birçok elektrikli bisikletler bulunmaktadır ve bu bisikletlerin müsait olma durumunun bilgisine cep telefonu yardımıyla ulaşılması bu alanda yapılan çalışmalardandır. Akıllı otopark sistemleriyle birlikte sürücüler mobil uygulama ve levhalarla kolayca otopark hakkında bilgi edinebilir. Akıllı binalarda tüketilen enerji, su ve elektrik bilgisinin kontrol edilmesini sağlayan sensörler bulunmaktadır. Busensörler yardımıyla rahatlıkla kullanım bilgisine ulaşmaktadır. Bu örnekler gibi yapılan birçok çalışma ile şehirler akıllı şehir haline gelmektedir. İnsanlar refah seviyesi yüksek olan bu şehirlerde yaşamak istemektedir. Bununla birlikte üst yönetim ve belediyeler kendi şehir ve ilçelerine akıllı şehir olma yolunda adımlar atmaktadır. Akıllı şehir olma yolunda yapılan yatırımların en etkin şekilde yönetilebilmesi için mevcut durumun iyi analiz edilmesi ve ihtiyaçların net bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak akıllı şehir uygulamaları kent şehir yaşamında sürekli dönüşüm ve gelişmekte olan bir kavramdır. Bu dönüşüm ve gelişim kentlere ve insanlara birçok yönde olumlu katkılar sağlayacaktır. Artan teknoloji ile birlikte de dünya çapında bir çok ülke akıllı kent kavramına hakim olacaktır. Bu hakimiyetin Türkiye’de gerçekleştirilmesi için öncelikle mevcut durumun analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ile Türkiye’nin başkenti olan Ankara ilindeki 7 ilçenin akıllılık seviyeleri tespit edilmiştir.

3. Literatür Araştırması (Literature Review)

Literatürde Akıllı Şehir kavramını ele alan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ele alınan konuyu incelemenin yanı sıra gerçek hayattaki uygulamalarını da analiz etmektedir. Bu perspektifte hem Dünya’da hem de Türkiye’de analiz edilen şehirler mevcuttur. Dünya çapında yapılan çalışmalardan Angelidou [7]’nin 15 şehri ele aldığı araştırma dikkat çekmektedir. Angelidou [7] çalışmasında Amsterdam, Barselona ve Londra’yı içeren 15 şehrin Akıllı Şehir niteliklerini taşıyıp taşımadığını incelemiştir. Yine Londra’nın incelendiği başka bir çalışmada Canlı [8], dijital çağın dönüşen kentleri konusunu ele almıştır. Çalışmada Londra akıllı kent kapsamında üst düzeyde olan bir bölge olduğu ve kent stratejisine bakıldığında merkez olarak vatandaş kavramı ele alınmış olduğu tespit edilmiştir. Bilici ve Babahanoglu [5], yaptıkları çalışmada dünya üzerinde kentleşme ve nüfusun hızla arttığını dile getirmiş ve artan bu kentleşme ile birlikte vatandaşların refahını arttırmak ve yaşam koşullarını iyileştirmek adına “akıllı kentler” inşa etmekten söz etmiştir. Hem Dünya’yı hem de Türkiye’yi ele alan çalışmalar incelendiğinde Çetin ve Çiftçi’nin [9] yaptığı çalışma öne çıkmaktadır. Çalışmada Dünya ve ülkemizden örneklerle akıllı kent kavramı incelenmiş olup Dünya çapında akıllı kent bileşenlerinden olan akıllı çevre, akıllı ulaşım, akıllı yönetim, akıllı ekonomi konusu araştırılmıştır. Bununla birlikte akıllı insan ve akıllı yaşam bileşenleri de benimsendiği takdirde başarının daha da artacağı vurgulanmıştır.

Sadece Türkiye sınırları içerisinde yapılan çalışmalar incelendiğinde İstanbul [10], İzmir [11], Malatya [12] ve bu çalışmanın da uygulama alanı olan Ankara ilinin incelendiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalara ayrıntılı bir şekilde bakıldığında Çelikyay [10], teknoloji girdabında akıllı şehre dönüşüm konusunda İstanbul ilini incelemiştir. Akıllı şehir kriterlerine ulaşmada İstanbul için öneriler sunmuştur. Hayta [11], yaptığı çalışmada fertlerin şehir seçimlerinde nelerden etkilendiğini

ve bu etkilenme faktörlerden bahsetmiştir. İzmir şehrini ele alarak bir inceleme yapmıştır. Bu çalışmada İzmir’de yaşayan fertlerin o bölgeyi seçmelerindeki sebepler ve o şehir ile ilgili görüşlerini tespit etme amacıyla anket tekniği kullanılmıştır. Adıgüzel [13], yaptığı çalışmada akıllı kent bağlamında Türk kentleri için bir değerlendirme modelini ele almıştır. Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmalardan da yararlanarak Türk kentlerinin akıllı kent kavramı kapsamında değerlendirilmesini amaçlanmıştır. Akdamar [14], yaptığı çalışmada akıllı kent idealine ulaşmada büyük verinin önemi konusunu dile getirmiştir. Bu çalışmada büyük veri ile akıllı kentlerin ilişkisini açıklamak için ISO 37120:2014 Standardı örnek olarak aktarılmıştır. Büyük veri ile ilgili teknoloji ve yöntemler incelenmiştir. Büyük veri ile ilişkili olan; veri madenciliği, nesnelerin interneti, makine öğrenmesi, bulut bilişim gibi yöntem ve teknolojilerin; gelecekteki kentleri yönetmek ve verimli hizmet sunmak, Ar-Ge ve inovasyon çalışmalarına destek vermek, yeni ürün ve hizmetler üretmek ile ilgili önemi belirtilmiştir. Erkek [15], yaptığı çalışmada “Akıllı Şehircilik” anlayışını ve belediyelerin inovatif uygulamalarını ele almıştır. Yapılan bu çalışmada bir şehrin akıllı olmasının sadece akıllı ulaşım ve akıllı enerji kavramlarından ibaret olmadığı akıllı afet yönetimi, akıllı kampüs, akıllı eğitim gibi akıllı şehir unsurlarının da bu kapsamda akıllı şehir kavramına dahil olduğu belirtilmiştir. Varol [3], yaptığı çalışmada akıllı şehir kavramının Türkiye’de ne derecede yaygın olduğunun bilgisine ulaşmak ve Ankara şehrini ele alarak bu şehirde yapılan çalışmaları göz önüne sermeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda Ankara Büyükşehir Belediyesi ve Ankara ilinde yer alan 7 ilçe akıllı şehir uygulamalarının yeterliliklerine göre incelenmiştir. Köseoğlu ve Demirci [16], yaptığı çalışmada akıllı şehirler konusu ve lokal problemlerin çözümünde teknolojinin yenilikçi bir şekilde kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Dijital teknolojilerde olan gelişmelerin git gide artmasıyla akıllı şehirler ve lokal problemlerin çözümünde teknolojilerin akıllı bir şekilde kullanımı, vatandaşın beklentilerini karşılamak, taleplerini hızlı ve uygun bir şekilde geri dönüş yapmak, katılımcı demokrasiyi güçlendirmek ve yerel yönetimlerin şeffaf ve bir şekilde yönetilebilmesi sağlamak gibi imkânları ortaya çıkardığını dile getirmiştir. Şolt [17], yaptığı çalışmada kentsel yaşanabilirlik ve sosyo-ekonomiklik kavramı üzerinde durmuştur. Daha yaşanabilir kentler oluşturmak için başta sürdürülebilirlik kavramı olmak üzere ekonomik ve sosyal dengenin hesaba katılması gerektiğini belirtmiştir ve özellikle ekonominin yalnızca tek bir faktör olmadığı sosyal ve kültürel özelliklere ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Yılmaz vd. [12], yaptığı çalışmada Malatya kenti için akıllı kent önerilerini dile getirmiştir. Bir kentin akıllı olabilmesi için kent planlama mekanizmasının ve kent dinamiklerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Çetin ve Gürsoy [18], yaptığı çalışmada Akıllı şehir kavramının yaklaşımını ve Türkiye’de bulunan büyükşehirler için uygulama olanaklarını belirtmiştir. Çalışmada küresel çevre sorunlarının giderilmesi ve çözümlenmesi adına yapılması planlanan çalışmalar kronolojik olarak dile getirilmiştir. Mirghaemi [19], yaptığı çalışmada Akıllı kentler üzerine inceleme yapmıştır ve Türkiye örneğini ele almıştır. Akıllı şehirler, insan yararına olacak hizmetlerden oluşan, kıt kaynakların en etkili şekilde kullanımını sağlayan, verimlilik artışını hedefleyen bir olgudur fikrini belirtmiştir ve Türkiye’de akıllı kent kavramının giderek arttığı aynı zamanda birtakım çalışmaların başladığını belirtmiştir. Öztöpcü ve Salman [20], yaptıkları çalışmada sürdürülebilir kalkınma konusunda akıllı şehirlerin öneminden bahsetmişlerdir. Bu çalışmada akıllı şehirlerin sürdürülebilir kalkınma konusundaki etkilerini saptamak hedeflenmiştir. Bu çalışmanın akıllı kentler konusunda birçok çalışanlara, inşaat sektörüne, kalkınma politikalarına, şehir bölge planlama ve mimarlık sektörüne katkıda bulunabileceği düşüncesine saptanmıştır.

Literatürde akıllı şehir analizi yapılan çalışmalarda ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı araştırmalar öne çıkmaktadır. İlk olarak Şepit ve Paksoy [21], yaptıkları çalışmada şehirlerin sürdürülebilirlik düzeylerini ÇKKV yöntemleri ile Türkiye’nin 9 ilinin sürdürülebilirlik düzeylerini değerlendirmişlerdir. Milošević vd. [22] akıllı şehirlerde mimari mirasın yönetimini ÇKKV yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Mimari mirasın korunması ve muhafazası kararında öncelikli olanları belirlemek için yamuk ve üçgen bulanık AHP ve aralıklı gri AHP kullanılarak 22 farklı kriter sıralamışlardır. Hajduk ve Jelonek [23] yaptıkları çalışmada akıllı şehirleri ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS, AHP ve DEA ile değerlendirmişlerdir. Şehirleri belirtilen yöntemlerle kentsel enerji temelinde incelemişlerdir. Özkaya ve Erdin [2] ise içinde İstanbul’un da yer aldığı 44 şehri ANP ve TOPSIS yöntem entegrasyonu ile sıralamışlardır. Sıralama için 47 gösterge kullanılmış olup literatüre ele aldıkları göstergeler ve alternatifler açısından katkı sağlamışlardır. Rad vd. [24] yaptıkları çalışmada akıllı şehir kriterlerinin önemini sıralamak için ANP ve DEMATEL yöntemleri kullanmışlardır. Tahran ve Seul için u-katsayıları sırasıyla 0.449 ve 0.918 olarak hesaplamışlardır. Zapolskytė vd. [25] yaptıkları çalışmada bireysel şehirlerin akıllı mobilite sistemlerini ve altyapılarını karşılaştırmak için AHP yöntemini kullanmışlardır. Yapıcı vd. [26] ile sürdürülebilir yeşil kampüs için ANP yöntemi ile yatırım alternatiflerini değerlendirmişlerdir.

Sonuç olarak literatür incelendiğinde ÇKKV yöntemleri ile şehirlerin analiz edildiği ve şehirlerin değerlendirildiği görülmektedir. Fakat ÇKKV yöntemleri Ankara ilindeki ilçelerin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği bir çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Varol [3]'ün çalışmasında Ankara ilindeki 7 ilçe akıllı şehir uygulamaları açısından incelenmiş olup yapılan incelemeler sonucunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmada ise Varol'un [3] elde ettiği araştırma sonuçları kullanılarak 7 ilçe problemin çok kriterli ve çok amaçlı yapısı dikkate alınarak ÇKKV yöntemleri değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmenin sonucunda ilçelerin akıllı şehir seviyeleri tespit edilmiştir. Bu çalışma hem ele alınan problem açısından hem de kullanılan yöntem entegrasyonu açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Bu çalışma doğrultusunda ilçelerin eksikleri ve bu eksiklerinin neler olduğu saptanabilir hale gelmiştir, ilçelerin daha da geliştirilerek akıllı şehirler olması için yapılacak yeni projeler adına bu çalışma öncülük edecektir.

4. Materyal ve Yöntem (Material And Method)

Karar verme; bir sorunu çözmek ve hedefe ulaşmak için birtakım kriterler doğrultusunda, olağan durumda olan tüm alternatifler arasından bir ya da birkaçını seçme işlemidir [27]. ÇKKV ise birden fazla ve çoğunlukla birbirine aykırı olan durumlarda var olan kriterlerin ile alternatifler arasından seçim yapılmasını belirtir [28]. Karar Biliminin bir alt dalını oluşturur ve farklı yaklaşımları içeren bir yöntemler bütünüdür. ÇKKV yönteminde karar verme aşamasını model yardımıyla karar vericinin maksimum düzeyde fayda sağlayacağı şekilde analiz edilir [29]. ÇKKV, karar vericiler açısından çok sayıda birbirinden bağımsız faktörün etkisini dikkate alarak, en uygun kararın verilmesinde destek olan yöntemlerdir [30]. En çok kullanılan ÇKKV yöntemleri AHP, TOPSIS, ELECTRE, ANP, PROMETHEE, VIKOR' dur. Bu çalışma kapsamında ÇKKV yöntemlerinden olan ANP ve PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. ANP yöntemi alt kriterler ve kriterler arasındaki ilişkileri değerlendirebilmesi ve bununla birlikte tek bir yöne bağlı modelleme zorunluluğunu ortadan kaldırarak karar vericilere daha tutarlı ve hassas sonuçlar sunabilmesi sebeplerinden dolayı çözüm yöntemi olarak seçilmiştir. PROMETHEE yöntemi ise zıt yönlü kriterleri herhangi bir dönüşüm yapma zorunluluğu olmadan değerlendirebilmesi ve nitel ifadeleri algoritma içinde rahatlıkla kullanabilmesi sebeplerinden dolayı seçilmiştir. Ayrıca ÇKKV yöntemleri teknoloji seçiminden [31] tesis planlamasına [32, 33], strateji seçiminden [34], bakım yönetimine [35] farklı birçok alanda uygulanmaktadır.

4.1. ANP yöntemi (ANP method)

ANP yöntemi, Thomas L. Saaty [36] tarafından geliştirilmiştir ve karar problemlerinde sıklıkla kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. ANP, aynı kümedeki öğeler arasındaki bağımlılıkları (iç bağımlılık) ve farklı kümelerdeki öğeler arasındaki bağımlılıkları (dış bağımlılık) dikkate almaktadır. İç bağımlılık, aynı küme içindeki kriterler arasında bir etkileşim olup olmadığı göstermektedir. Dış bağımlılık, farklı bir kümedeki kriterler arasında bir etkileşim olduğunu ifade etmektedir [37].

ANP yöntemi kolay uygulanabilirliğinin yanında sektör veya alan fark etmeksizin birçok problemin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [38]. ANP yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [39].

Adım 1: Karar Verme Probleminin Belirlenmesi: İlk adımda ele alınan problem tanımlanmaktadır. Yapılan tanımda karar verme probleminin kriterleri varsa alt kriterleri ve alternatifleri belirlenmektedir.

Adım 2: Kriterlerin Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi: Belirlenen kriterlerin birbirleriyle olan etkileşimleri, her bir kriterin dışsal ve içsel etkileşimleri ve mevcut olan geri bildirimleri bu adımda ilişkilendirilmektedir. Uzman kişilerin görüşleri alınıp mevcut problemle ilgili literatür incelemesi yapılmaktadır.

Adım 3: Kriterler Arası İkili Karşılaştırmaların Yapılması: Birbiri ile alakası olduğu düşünülen her bir kriterin kendi arasında ikili karşılaştırması yapılmaktadır. Bu ikili karşılaştırmaların sonucu bir matriste toplanmaktadır.

Adım 4: Karşılaştırma Matrislerinin Tutarlılık Oranının Hesaplanması: Bu adımda, yapılan karşılaştırmaların anlamlı olup olmadığını belirlemek için tutarlılık oranı hesaplanmaktadır. Karşılaştırma değerleri verildikten sonra her bir matris için tutarlılık oranı (CR) hesaplanmaktadır.

CR = tutarlılık indeksi (CI) / rastgele tutarlılık indeksi (RI) denklemi kullanılarak CR hesaplanmaktadır.

Adım 5: Süper Matrislerin Oluşturulması: Bu adımda kriterler arası değerlendirmeler sonucu ortaya çıkan değerler ağırlıklandırılmamış süper matris adı verilen büyük bir matris altında toplanmaktadır. Daha sonra bu süper matrisin değerlerinin kendi içinde bulunan ilgili kümelerin ağırlıklandırılmış değerleri ile çarpılması sonucu ağırlıklandırılmış süper matris elde edilmektedir.

Adım 6: Alternatiflerin Değerlendirilmesi: Yapılan tüm bu işlemler sonucunda elde edilen limit süper matriste alternatifler arasında kıyaslama yapmak ve en iyi alternatifi görebilmek mümkündür. Buradaki en büyük değer en iyi alternatifi temsil etmektedir [36].

4.2. PROMETHEE yöntemi (PROMETHEE method)

PROMETHEE yöntemi, 1982 yılında Jean Pierre Brans tarafından geliştirilen ÇKKV yöntemlerinden biridir [40]. 1985 yılında Brans ve Vincke bu yöntemi daha da genişleterek yeni halini almasını sağlamışlardır. Bu yöntem birçok alternatiflerin sıralanması ve seçilmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. PROMETHEE yöntemi alternatiflerin seçilen kriterler vasıtasıyla tercih fonksiyonlarına dayanarak ikili karşılaştırmalar yapılmak suretiyle değerlendirildiği bir ÇKKV yöntemidir. Bu değerlendirme, alternatiflerin kriterler temelindeki üstünlük durumlarını birleştirme yöntemi ile gerçekleşmektedir [41]. PROMETHEE yöntemi literatürde yer alan mevcut önceliklendirme yöntemlerinin uygulama aşamasındaki zorluklarından hareketle geliştirilmiş ve günümüze kadar birçok problemin çözümünde kullanılmıştır [42]. Bir sıralama algoritmasıdır. Tercih fonksiyonları kullanıcının belirlediği kriterlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu tercih fonksiyonları Olağan tip, U-tipi, Seviyeli tip, V-tipi, Gaussian ve Doğrusal şeklindedir. PROMETHEE yöntemini diğer yöntemlerden ayıran bir özelliği vardır bu özellik her bir değerlendirme faktörünün kendi içinde değerlendirilmesi aşamasıdır. PROMETHEE yöntemi 7 adımdan oluşmaktadır [43].

1. *Adım:* Öncelikle ilk adımda karar noktaları tanımlanır ve ardından değerlendirme faktörleri belirlenir. Daha sonra tanımlanan değerlendirme faktörlerinin önem ağırlıkları belirlenir ve son olarak veri tablosu hazırlanır.

2. *Adım:* Yapılacak işlemin türüne göre tercih fonksiyonu tanımlanır.

3. *Adım:* Alternatifler için ortak tercih fonksiyonları belirlenir ve bu fonksiyonlar Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$P(x, y) = \begin{cases} 0 & , f(x) \leq f(y) \\ p[f(x) - f(y)], f(x) > f(y) \end{cases} \quad (1)$$

4. *Adım:* Her alternatif çifti için Eşitlik 2’ de verildiği gibi indeks hesaplanır.

$$\pi(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^k w_i * P_i(x, y)}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (2)$$

5. *Adım:* A alternatifi için Eşitlik 3 ve Eşitlik 4’te gösterildiği gibi pozitif ve negatif üstünlük hesaplanır.

$$\Phi^+(x) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(x, y) \quad (3)$$

$$\Phi^-(x) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(y, x) \quad (4)$$

6. *Adım:* PROMETHEE I ile alternatifler için kısmi öncelikler belirlenir. 3 farklı durum söz konusu olmaktadır.

I. *Durum:* Aşağıda bulunan koşullardan eğer herhangi biri sağlanıyor ise x alternatifi y alternatifine tercih edilmektedir. Eşitlik 5, 6 ve 7’de denklemler verilmiştir.

$$\Phi^+(x) > \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) < \Phi^-(y) \quad (5)$$

$$\Phi^+(x) > \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) = \Phi^-(y) \quad (6)$$

$$\Phi^+(x) = \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) < \Phi^-(y) \quad (7)$$

II. *Durum:* Aşağıda bulunan koşullar sağlanıyor ise x alternatifinin y alternatifinden farkı yoktur. Eşitlik 8’de denklemler verilmiştir.

$$\Phi^+(x) = \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) = \Phi^-(y) \quad (8)$$

III. Durum: Aşağıda Eş. 9 ve Eş. 10'da verilen koşullardan herhangi biri sağlanıyorsa x alternatifi y alternatifi ile karşılaştırılmaz.

$$\Phi^+(x) > \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) > \Phi^-(y) \quad (9)$$

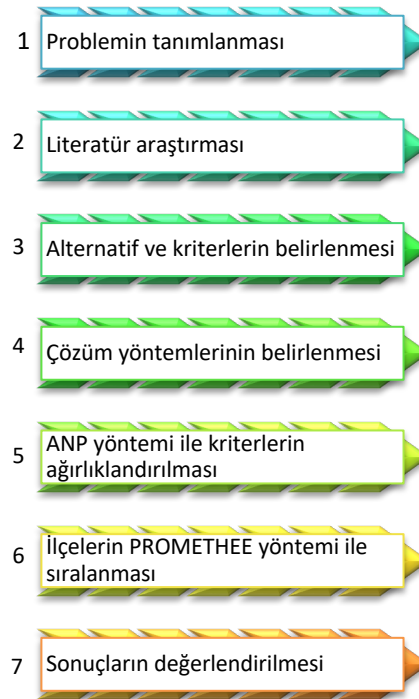
$$\Phi^+(x) < \Phi^+(y) \text{ ve } \Phi^-(x) < \Phi^-(y) \quad (10)$$

7. Adım: PROMETHEE II ile alternatifler için tam önceliklerin belirlenmesi aşamasıdır. PROMETHEE II' de Eş. 11'de verilen formül yardımıyla alternatiflerin tam öncelikleri belirlenir. Hesaplanan alternatiflerin tam öncelik değerleri kullanılarak alternatifler aynı düzlemde değerlendirilerek genel sıralama belirlenir [36].

$$\Phi(x) = \Phi^+(x) - \Phi^-(x) \quad (11)$$

5. Uygulama (Case Study)

Çalışmada Şekil 1'de gösterilen akış şemasında da belirtildiği gibi ilk olarak problem tanımlanmıştır. Problemin tanımlanmasının ardından literatür araştırması yapılmış, alternatif ve kriterler belirlenmiştir. Probleme uygun çözüm yöntemi olarak ÇKKV yöntemlerinden ANP ve PROMETHEE yöntemi belirlenmiştir. ANP yöntemiyle kriter ağırlıklandırılması yapılmıştır. PROMETHEE yöntemiyle de alternatifler sıralanmıştır. Yapılan yöntemlerin ardından sonuç ve değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 1. Uygulama akış şeması (Flow chart)

5.1. Problemin tanımlanması (Defining the Problem)

Problemdeki ana hedef Ankara'da bulunan ilçelerin akıllı şehir düzeyine göre sıralanması ve hangi ilçenin diğerlerine göre üstün olduğunu bulmaktır. Problemi çözmek için öncelikle hedef belirlendi. Ardından alternatifler değerlendirildi ve toplamda 7 olmak üzere Altındağ, Keçiören, Yenimahalle, Mamak, Çankaya, Etimesgut, Sincan seçildi. Daha sonra alternatifleri etkileyen kriterler belirlendi. Bunlar toplamda 6 tane olmak üzere akıllı yaşam, akıllı çevre, akıllı hareketlilik, akıllı yönetim, akıllı ekonomi ve akıllı insandır. Bu kriterler literatürde yapılan çalışmalarla [2, 3] belirlenmiştir. Literatürde edinilen bilgilere göre akıllı şehir kavramının 6 bileşeni bulunmaktadır. Bu kapsamda bu çalışmada bu 6 bileşen kriter olarak ele alınmıştır. Bu kriterler bir akıllı şehirde olması gereken temel özellikler olarak da belirtilebilmektedir. Bu kriterler bir akıllı şehirde olması gereken temel özelliklere göre belirlenmiştir. Bu kriterlerden yola çıkarak alt kriterler belirlenmiştir. Akıllı yaşam kriterinin alt

kriterleri olarak bir toplumda akıllı yaşam unsurlarını içeren kamu güvenliği, itfaiye hizmetleri, sağlık ve eğitim hizmetleri belirlenmiştir. Akıllı çevre kriterinin alt kriterleri olarak çevre için önem arz eden alt yapı ve su takip sistemleri, çevre kalitesi ve geri dönüşüm ölçümü son olarak da enerji tüketimi ele alınmıştır. Akıllı hareketlilik kriterinin alt kriterleri olarak ise trafik yoğunluk ölçümü, akıllı kavşak ve durak, GPS takip ve yol sensörü belirlenmiştir. Akıllı yönetim kriterinin alt kriterleri olarak bilinç düzeyi, plan politika, mobil uygulama, vergi ve imar olarak belirlenmiştir. Akıllı ekonomi kriterinin alt kriterleri ise girişimcilik, inovasyon, verimlilik yerel ve küresel bağlardır. Akıllı insan kriterinin alt kriterleri olarak sosyal alt yapı ve kültürel etkileşim belirlenmiştir. Ele alınan bu alternatifler ve kriterler ile çözüm yapılarak hedefe ulaşılmıştır. Problemde Ankara'nın ilçeleri akıllı şehir düzeyine göre sıralanmıştır.

5.2. Alternatiflerin belirlenmesi (Determination of alternatives)

Yapılan bu çalışmada alternatif seçenekleri olarak Ankara iline bağlı bulunan toplam 25 ilçe göz önüne alınmıştır. Akıllı şehir analizinde, Ankara ilinin akıllı şehir kriterlerine uygun alternatif ilçelerinin belirlenmesinde ilçelerin nüfus yoğunluğu, ilçelerin yüz ölçümü, ilçelerin gelişmişlik düzeyleri, akıllı şehir unsurlarının ilçelerdeki varlıkları ve akıllı şehir ile ilgili yapılan çalışmalar etkili olmuştur. Bu kapsamda yapılan araştırmalar sonucu Çankaya, Keçiören, Yenimahalle, Mamak, Etimesgut, Sincan, Altındağ ilçeleri alternatif olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda bu alternatiflerin belirlenmesinde literatürde bu ilçeler ile ilgili çalışmaların [3] olması etkili olmuştur.

5.3. Kriterlerin belirlenmesi (Determination of criteria)

Akıllı Şehir kavramı altında, bir şehri “akıllı” yapabilecek birçok bileşen bulunmaktadır. Proje kapsamında literatür taraması sonucunda 6 ana kriter belirlenmiştir ve bunlara bağlı olarak da alt kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler ve alt kriterler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kriterler ve alt kriterler (Criteria and sub criteria)

Ana Kriter	Alt Kriter	Açıklama
Akıllı Yaşam	Kamu Güvenliği	Akıllı yaşam, kamu güvenliği, suçla mücadele (kamera ya da sesli takip sistemleri), kentsel acil müdahale ve denetleme, afet yönetimi, itfaiye, sağlık ve eğitim hizmetleri, kültür ve turizm hizmetlerinde iletişim/yönlendirme gibi uygulamaları içermektedir.
	İtfaiye Hizmetleri	
	Sağlık ve Eğitim Hizmetleri	
Akıllı Çevre	Altyapı ve Su Takip Sistemleri	BİT desteği ile çevre ve doğanın sürdürülebilirliği sağlanabilmesi, yeşil alanlar ve su kaynakları kontrol edilebilmesidir. Yenilenebilir enerji, sürdürülebilir kaynak yönetimi, akıllı enerji şebekeleri, mikro şebekeler, akıllı sayaçlar, ileri hava kirliliği izleme sistemleri, çevre dostu yeşil binalar, yeşil şehir planlaması, enerji verimli akıllı sokak aydınlatmaları, katı atık yönetimi, akıllı su yönetim ve drenaj sistemlerini kapsamaktadır.
	Çevre Kalitesi ve Geri Dönüşüm Ölçümü	
	Enerji Tüketimi	
Akıllı Hareketlilik	Trafik Yoğunluk Ölçümü	Akıllı hareketlilik kavramı bilgi ve iletişim teknolojileri destekli nakliye ve lojistik hizmetlerini kapsamaktadır. Kentin lojistik akışını geliştirmek adına trafik koşullarını, coğrafi ve çevresel etmenleri etkin bir şekilde kentin hareketlilik düzenine entegre edebilme kabiliyetidir. Kentin hareket kabiliyetinin artırılması için, yenilikçi ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin kurulması, çevre ile dost yakıtlara dayalı toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi bu kavram içerisinde değerlendirilebilir.
	Akıllı Kavşak ve Durak	
	GPS Takip ve Yol Sensörü	
Akıllı Yönetişim	Bilinç Düzeyi	Akıllı yönetim başlığı altında belediyelerin akıllı kentler konusundaki kurumsal kapasiteleri ve bilinç düzeyleri, geliştirdikleri plan politikalar, e-yönetim sistemleri uygulamaları, kent sakinlerinin karar alma süreçlerine katılımı bu kapsamda mobil uygulamalar, vergi ve imar takibi konusunda geliştirilmiş çevrimiçi sistemler incelenmiştir.
	Plan Politika	
	Mobil Uygulama	
	Vergi ve İmar	
Akıllı Ekonomi	Girişimcilik	Akıllı Ekonomi Akıllı Şehir kavramının bir bileşenidir. Akıllı Ekonomi kavramı genel olarak girişimcilik, yerel ve küresel bağlar yenilikçi ruh, ekonomik imaj ve ticari markalar, inovasyon ve verimlilik ile ilişkilidir.
	İnovasyon	
	Verimlilik	
	Yerel ve Küresel Bağlar	
Akıllı İnsan	Sosyal Altyapı	Üretkenliği geliştiren ve yeniliği teşvik eden kapsayıcı bir toplumda, eğitim-öğretim, insan kaynakları ve kapasite yönetimine erişebilen, BİT etkin bir ortamda çalışan e-becerilerden oluşmaktadır. Farkındalığı, katılımcılığı ve yaratıcılığı yüksek, hayat boyu öğrenen, bilişim teknolojilerini hayatına dâhil etmiş, beşerî ve sosyal sermayenin ana unsuru ve şehir yaşamının odak noktası olan bireydir.
	Kültürel Etkileşim	

5.4. Problemin çözülmesi (Solution of the problem)

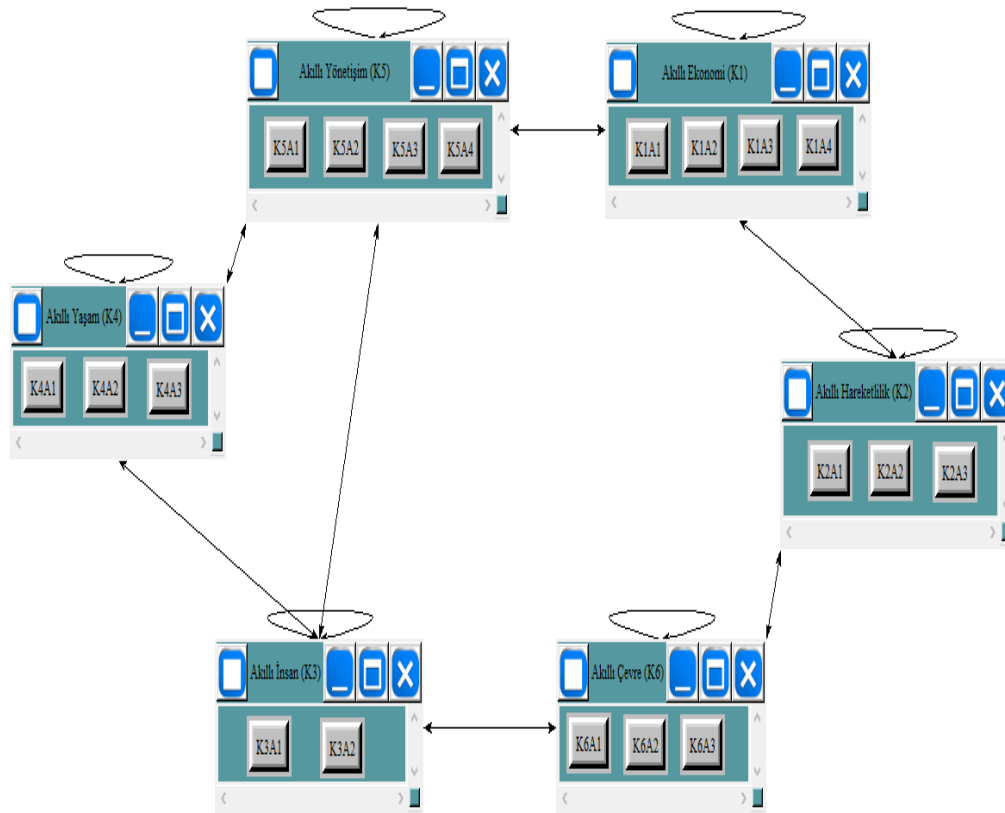
Problemin çözüm aşamasında Bölüm 5.2’ de belirtilen alternatifler Bölüm 5.3’ te belirtilen kriterler kapsamında ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmiştir. İlk aşamada kriterler ANP yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve ardından bu ağırlıklar kullanılarak PROMETHEE yöntemi ile ilçeler sıralanmıştır.

5.4.1. Kriterlerin ANP yöntemi ile ağırlıklandırılması

ANP yönteminde problemleri çözerken, bileşenler arasındaki ilişkiler ve yönler ağ yapısı ile belirlenir. Bu ağ yapısı sayesinde bileşenlerin ve bu bileşenlerin alt bileşenleri arasındaki doğrudan ve dolaylı yoldan oluşan ilişkiler belirlenebilmektedir. ANP yönteminde karar verme problemleri bir ağ şeklinde modellenmekte ve bu aşamada kriter grupları arasındaki dış bağımlılıkları, geri bildirimleri ve aynı kriter grubu içinde yer alan iç bağımlılıkları da hesaplanmaktadır [44].

Adım 1: ANP’nin ilk adımı olarak karar verilen problem tanımlandıktan sonra alternatifler, kriterler ve alt kriterler belirlenmiştir.

Adım 2: Belirlenen alt kriterlerin birbirlerini etkileyenler arasında bir ilişki oluşturulmuştur ve Super Decisions programı kullanılarak ağ yapısı kurulmuştur. Şekil 2’de görüldüğü gibi ağ yapısı karmaşık bir yapıdadır.



Şekil 2. ANP ağ yapısı (ANP network structure)

Adım 3: Birbiri ile ilişkisi olduğu varsayımı olan ölçütlerin her biri kendi arasında ikili karşılaştırma yapılır. Bu yapılan ikili karşılaştırmaların sonucunda bir matris toplanır ve ağırlıklar belirlenir.

Adım 4: Tutarlılık kontrolü yapılır. Karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup olmadığına bakılmıştır. Tutarlılık oranı 0,1 ‘den küçük çıktığı için sonuç tutarlıdır.

Adım 5: Süper matrisler sırayla oluşturularak kriterlerin ve alternatiflerin önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Tablo 2’de alt kriterlerin yerel ve global ağırlıkları verilmiştir. Yerel ağırlık her bir kriterin hiyerarşik yapıdaki bir üst seviyedeki öğeyi karşılama oranını, global ağırlık ise her bir kriterin hiyerarşik yapının en tepesinde yer alan öğeyi karşılama oranını ifade etmektedir.

Tablo 2. Kriterlerin ağırlıkları (Weights of the criteria)

Alt kriterler	Alt kriter yerel ağırlığı	Alt kriter global ağırlığı
Kamu Güvenliği	0.33333	0.060606
İtfaiye Hizmetleri	0.33333	0.060606
Sağlık ve Eğitim Hizmetleri	0.16667	0.030303
Altyapı ve Su Takip Sistemleri	0.16667	0.030303
Çevre Kalitesi ve Geri Dönüşüm Ölçümü	0.40000	0.060606
Enerji Tüketimi	0.40000	0.060606
Trafik Yoğunluk Ölçümü	0.20000	0.030303
Akıllı Kavşak ve Durak	0.60000	0.090909
GPS takip ve Yol Sensörü	0.40000	0.060606
Bilinç Düzeyi	0.40000	0.060606
Plan Politika	0.20000	0.030303
Mobil Uygulama	0.40000	0.060606
Vergi ve İmar	0.42857	0.090909
Girişimcilik	0.14286	0.030303
İnovasyon	0.14286	0.030303
Verimlilik	0.28571	0.060606
Yerel ve Küresel Bağlar	0.20000	0.030303
Sosyal Altyapı	0.40000	0.060606
Kültürel Etkileşim	0.40000	0.060606

5.4.2. İlçelerin PROMETHEE yöntemi ile sıralanması (Ranking of county by PROMETHEE method)

ANP yönteminden elde edilen ağırlık PROMETHEE yönteminde kullanılarak ilçelerin sıralaması elde edilmiştir. İlk olarak kriter ağırlıkları ve veriler Visual PROMETHEE programına girilmiştir. Veri girişi Şekil 3-4'te verilmiştir.

Şekil 5' te ise PROMETHEE sonucu verilmiştir. Şekil 5' de görüldüğü üzere en iyi alternatif Çankaya ilidir. Ardından sırasıyla; Yenimahalle, Keçiören, Sincan, Mamak, Etimesgut ve Altındağ illeri gelmektedir.

Literatürde yapılan araştırmalar, ANP ve PROMETHEE yöntemleriyle varılan sonuçlara göre Çankaya ilçesinde akıllı şehir adına yapılan çalışmaların diğer ilçelere göre daha fazla olduğuna saptanmıştır. Aynı şekilde Altındağ ilçesinin de diğer ilçelere göre akıllı şehir kapsamında geride kaldığı gözlemlenmiştir. Çankaya ilçesinden sonra sırasıyla Yenimahalle, Keçiören, Sincan, Mamak, Etimesgut ve Altındağ gelmektedir. Bu ilçelerin her biri akıllı şehir kapsamında eksikleri çok olsa da gelişmeye açıktır ve gelecekte daha da gelişmiş bir düzeyde olacağı düşünülmektedir.

Scenario1	Yaşam A1	Yaşam A2	Yaşam A3	Çevre A1	Çevre A2	Çevre A3	Hareketlilik A1	Hareketlilik A2	Hareketlilik A3	Yönetişim A1
Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences										
Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,09
Preference Fn.	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics										
Minimum	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	4,00	2,00	4,00	4,00
Maximum	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00
Average	3,00	3,00	3,71	2,00	3,29	4,14	4,29	3,14	4,71	4,29
Standard Dev.	1,20	1,20	1,16	0,00	1,16	0,99	0,45	0,99	0,45	0,45
Evaluations										
Çankaya	very good	very good	very good	bad	very good	very good	very good	good	very good	good
Keçiören	good	bad	good	bad	bad	good	good	good	very good	good
Yenimahalle	good	good	good	bad	bad	very good	good	good	very good	good
Mamak	bad	bad	bad	bad	good	good	good	bad	good	good
Etimesgut	bad	bad	bad	bad	bad	good	good	bad	very good	good
Sincan	bad	good	very good	bad	good	very good	very good	good	very good	very good
Altındağ	bad	bad	good	bad	good	bad	good	bad	good	very good

Şekil 3. PROMETHEE veri girişi-1 (PROMETHEE data entry-1)

Yönetişim A2	Yönetişim A3	Yönetişim A4	Ekonomi A1	Ekonomi A2	Ekonomi A3	Ekonomi A4	İnsan A1	İnsan A2
5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
max	max	max	max	max	max	max	max	max
0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03	0,09	0,06
Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level	Level
absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2,00	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	2,00
5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00
4,00	3,57	4,71	4,00	4,29	3,71	4,00	3,71	3,71
0,93	1,05	0,45	0,93	0,45	0,70	0,00	1,16	1,16
very good	very good	very good	very good	very good	good	good	very good	very good
good	good	very good	very good	very good	good	good	good	good
good	good	good	good	good	good	good	good	very good
very good	bad	very good	good	good	good	good	good	good
bad	bad	very good	good	good	good	good	very good	good
good	good	good	good	good	good	good	bad	bad
good	good	very good	bad	good	bad	good	bad	bad

Şekil 4. PROMETHEE veri girişi-2 (PROMETHEE data entry-2)

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Çankaya	0,2327	0,2327	0,0000
2	Yenimahalle	0,1621	0,2024	0,0404
3	Keçiören	0,1264	0,1821	0,0557
4	Sincan	-0,0152	0,1415	0,1567
5	Mamak	-0,0509	0,1110	0,1619
6	Etimesgut	-0,1569	0,0757	0,2326
7	Altındağ	-0,2982	0,0656	0,3638

Şekil 5. İlçelerin sıralaması (Ranking of cities)

6. Sonuç ve Tartışma (Result And Discussion)

Akıllı şehir kavramı dışarıdan sadece teknolojik bir çalışma gibi görünse de ekonomi, çevre, insan ve yasal unsurları da içinde barındırmaktadır. Akıllı şehirler teknolojiyi kullanarak insanlar için kolaylık sağlama ve sorunlara çözüm bulmaya çalışmaktadır. Akıllı şehir girişiminin amacı şehirlerin sürdürülebilirliğini sağlamak, sadece günümüzde değil gelecek nesiller için de yaşanabilir bir dünya bırakmak, sosyal aktiviteleri arttırmak, hayat şartlarını kolaylaştırmak ve en önemlisi yaşadığımız yerde mutlu ve güvenilir bir ortam oluşturmaktır. Dünya da hızlı bir kentleşme olmaktadır ve kaynakların etkin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda devreye teknoloji ve akıllı şehir kavramı girmektedir. Dünya çapında bakıldığında gelişmiş birçok ülke hızla akıllı şehir kavramını benimsemiş ve akıllı şehir olmak için önemli yatırımlar yapmışlardır.

Hükümetler ve il yöneticileri, sorumluluklarının olduğu şehirleri daha sürdürülebilir ve üretken kılmak ve yaşam kalitesi açısından daha çekici hale getirmek için yeni yatırım ve politika alanları aramaktadırlar. “Akıllı ve sürdürülebilir şehir” kavramının çeşitli anlamlarına göre farklı yöntemler ve ölçüm endeksleri geliştirilmiştir. Niceliksel göstergelerden oluşan değerlendirme sistemleri, şehir yöneticileri ve politikacılar arasında büyük ilgi görmektedir. Böylece zamanlarını ve kaynaklarını nereye harcayacaklarına karar vermektedirler. Bu kapsamda bu çalışma da ele alınan ilçelerin yöneticilerine yol gösterir niteliktedir. Ayrıca bu çalışma kullanılan yöntem kombinasyonu açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada metropoliten kentlerden biri olan Ankara ili ele alınmıştır. Bu çalışmada Ankara iline ait ilçeler arasından belirlenen alternatifler, ÇKKV yöntemleri olan ANP ve PROMETHEE yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu Ankara’nın ilçelerinde akıllı şehir adına nelerin olduğu ve akıllı şehir bileşenleri araştırılıp ÇKKV yöntemleri için alternatifler ve kriterler tespit edilmiştir. Alternatif olarak Ankara’nın ilçeleri nüfus verilerine göre değerlendirilip 7 ilçe olmak üzere Altındağ,

Keçiören, Yenimahalle, Mamak, Çankaya, Etimesgut ve Sincan seçilmiştir. Kriterler akıllı şehir kavramının 6 temel bileşenleri olan akıllı yaşam, akıllı çevre, akıllı hareketlilik, akıllı yönetim, akıllı ekonomi ve akıllı insan olarak belirlenmiştir. Bu alternatifler ve kriterlerin önem dereceleri belirlenmiştir. Tespit edilen bu alternatifler ilk olarak ANP yöntemiyle alt kriterlerinde ağırlıkları bulunarak çözüm yapılmıştır. Ardından PROMETHEE yönteminde önce karar matrisi oluşturulmuştur. PROMETHEE yönteminin 7 adımı uygulanarak Visual PROMETHEE programıyla alternatifler sıralanmıştır.

Yapılan çalışmada ÇKKV yöntemlerinden olan ANP ve PROMETHEE yöntemleri ile Ankara ili için belirlenen alternatiflerin sıralamasına ulaşıldı. Araştırma sonucunda akıllı şehir açısından diğer ilçelere göre en çok uyumlu olan ilçe Çankaya ilçesidir ardından sırasıyla Yenimahalle, Keçiören, Sincan, Mamak, Etimesgut ve Altındağ gelmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen verilere göre ilçelerde akıllı şehir adına yapılan çalışmalar gözlemlenmiştir ve ilçeler sıralanmıştır. Bulunan bu sıraya göre ilçe yöneticileri ve vatandaşlar ilçelerin ne düzeyde olduğunu fark edebilir ve eksiklerini görüp yeni çalışmalara adım atabilirler.

İleride akıllı şehir kapsamında büyük şehirler ÇKKV yöntemleriyle hem genel büyükşehir belediyesi anlamında hem de ilçe bazında bölge olarak değerlendiren çalışmalar yapılabilir. Değerlendirilen bölgeler hem literatürde başka çalışmalar için kaynak olur hem de bölgede bulunan akıllı şehir unsurlarının yeterliliği bilgisine ulaşılmış olur. Ayrıca değerlendirilen akıllı şehirlerin hizmetlerini genişletmek için akıllı şehir projelerinin yatırım değerlendirilmesi ÇKKV yöntemleri ile yapıp şehrin gelişmesi için bir yol haritası çizilebilir. Ayrıca şehirlerin tamamının ele alındığı akıllı şehir uygulamaları için şehir seçimi yapılabilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2020/2 kapsamında 1919B012004669 başvuru numaralı proje ile desteklenmektedir. TÜBİTAK kurumuna teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] R. P. Dameri, "Searching for smart city definition: a comprehensive proposal," *Int. J. Comput. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 2544–2551, 2013. doi:10.24297/ijct.v11i5.1142.
- [2] G. Ozkaya and C. Erdin, "Evaluation of smart and sustainable cities through a hybrid MCDM approach based on ANP and TOPSIS technique," *Heliyon*, vol. 6, no. 10, pp. e05052, 2020. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05052.
- [3] Ç. Varol, "Sürdürülebilir gelişmede akıllı kent yaklaşımı: Ankara'daki belediyelerin uygulamaları," *Çağdaş Yerel Yönetimler*, cilt 26, sayı 1, ss. 43–58, 2017.
- [4] Ü. Kaygısız ve Z. A. Aydın, "Yönetimde yeni bir ufuk olarak akıllı kentler," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Dergisi*, cilt 9, sayı 18, ss. 55–81, 2017. doi:10.20875/makusobed.292381.
- [5] Z. Bilici ve V. Babahanoğlu, "Akıllı kent uygulamaları ve Konya örneği," *Akad. Yaklaşımlar Dergisi*, cilt 9, sayı 2, ss. 124–139, 2018.
- [6] A. Gül ve Ş. Ç. Atak, "Avrupa'da akıllı kent uygulamalarının değerlendirilmesi ve Çanakkale' nin akıllı kente dönüşümünün analizi," *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Dergisi*, cilt 22, sayı Kayfor 15 Özel Sayısı, pp. 1543–1565.
- [7] M. Angelidou, "The role of smart city characteristics in the plans of fifteen cities," *Journal of Urban Technology*, vol. 24 no. 4, pp. 3-28, 2017.
- [8] E. Canlı, "Dijital çağın dönüşen kentleri akıllı kentler: Londra örneği," Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2019.
- [9] M. Çetin ve Ç. Çiftçi, "Literatüre göre Dünya ve ülkemizden örneklerle akıllı kent kavramının irdelenmesi," *Ulus. Çevre Bilim. Araştırma Dergisi*, cilt 2, sayı 3, ss. 134–143, 2019.
- [10] H. H. Çelikyay, "Teknoloji girdabından akıllı şehre dönüşüm: İstanbul örneği," in *Bursa: 2nd Turkey Graduate Studies*

Congress, 2013.

[11] Y. Hayta, "Bireylerin kent seçimlerini etkileyen faktörler: İzmir örneği üzerinden bir inceleme," *Itobiad J. Hum. Soc. Sci. Res.*, cilt 5, sayı 8, 2016.

[12] B. Yılmaz, S. Görmüş ve S. Cengiz, "Malatya kenti için akıllı kent modeli önerisi," *Uluslararası Kentleşme ve Çevre Sorunları Sempozyumu: Değişim/Dönüşüm/Özgünlük (ISUEP2018)*, 28-30 Haziran 2018 Anadolu Üniversitesi – Eskişehir.

[13] M. Adıgüzel, "An evaluation model for Turkish cities in the context of smart city," Master Thesis, *Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2017.

[14] E. Akdamar, "Akıllı kent idealine ulaşmada büyük verinin rolü," *Kent Akad.*, cilt 10, sayı 30, ss. 200–215, 2017.

[15] S. Erkek, "'Akıllı şehirçilik' anlayışı ve belediyelerin inovatif uygulamaları," *Medeni. ve Toplum Dergisi*, cilt 1, sayı 1, ss. 55–72, 2017.

[16] Ö. Köseoğlu ve Y. Demirci, "Akıllı şehirler ve yerel sorunların çözümünde yenilikçi teknolojilerin kullanımı," *Uluslararası Polit. Araştırmalar Dergisi*, cilt 4, sayı 2, ss. 40–57, 2018. doi:10.25272/j.2149-8539.2018.4.2.03.

[17] H. B. H. Şolt, "Kentsel yaşanabilirlik kavramı ve sosyo ekonomik gelişmişlik," *Avrasya Sos. ve Ekon. Araştırmaları Dergisi*, cilt 5, sayı 6, ss. 71–85, 2018.

[18] O. Gürsoy, "Akıllı kent yaklaşımı ve Türkiye’deki büyükşehirler için uygulama imkânları," Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.

[19] S. A. Mirghaemi, "Akıllı kentler üzerine bir inceleme: Türkiye örneği," *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim. Dergisi*, cilt 12, sayı 2, ss. 37–46, 2019. doi:10.20854/bujse.628495.

[20] A. Öztöpcü ve A. Salman, "Sürdürülebilir kalkınmada akıllı kentler," *Karadeniz Uluslararası Bilim. Dergi*, sayı 41, ss. 167–188, 2019. doi:10.17498/kdeniz.476335.

[21] A. Şepit ve T. Paksoy, "Şehirlerin sürdürülebilirlik performanslarının bir bulanık çok kriterli karar verme tekniği ile değerlendirilmesi," *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknol. Dergisi*, cilt 7, sayı 1, ss. 30–48, 2019. doi:10.15317/Scitech.2019.180.

[22] M. R. Milošević, D. M. Milošević, A. D. Stanojević, D. M. Stević, and D. J. Simjanović, "Fuzzy and interval AHP approaches in sustainable management for the architectural heritage in smart cities," *Mathematics*, vol. 9, no. 4, pp. 304, 2021. doi:10.3390/math9040304.

[23] S. Hajduk and D. Jelonek, "A decision-making approach based on TOPSIS method for ranking smart cities in the context of urban energy," *Energies*, vol. 14, no. 9, p. 2691, 2021. doi:10.3390/en14092691.

[24] T. G. Rad, A. Sadeghi-Niaraki, A. Abbasi, and S.-M. Choi, "A methodological framework for assessment of ubiquitous cities using ANP and DEMATEL methods," *Sustain. cities Soc.*, vol. 37, pp. 608–618, 2018. doi:10.1016/j.scs.2017.11.024.

[25] S. Zapolskytė, M. Burinskienė, and M. Trepanier, "Evaluation criteria of smart city mobility system using MCDM method," *Balt. J. road Bridg. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 196–224, 2020. doi:10.7250/bjrbe.2020-15.501.

[26] S. Yapıcı, N. Oral, R. Yumuşak, ve T. Eren, "Sürdürülebilir yeşil kampüs için analitik ağ prosesi yöntemi ile yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi," *Kent Akademisi*, cilt 14, sayı 3, ss. 777-788, 2021. doi:10.35674/kent.959000.

[27] E. Özcan, R. Yumuşak, and T. Eren, "A novel approach to optimize the maintenance strategies: a case in the hydroelectric power plant," *Eksplot. i Niezawodn. Reliab.*, vol. 23, no. 2, pp. 324–337, 2021. doi:10.17531/ein.2021.2.12.

[28] E. C. Özcan, T. Danişan, R. Yumuşak, and T. Eren, "An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants," *Eksplot. i Niezawodn. Reliab.*, vol. 21, no. 3, pp. 400–418, 2020. doi:10.17531/ein.2020.3.3.

[29] M. Hamurcu and T. Eren, "Strategic planning based on sustainability for urban transportation: an application to decision-making," *Sustainability*, vol. 12, no. 9, p. 3589, 2020. doi:10.3390/su12093589.

[30] E. Özcan, R. Yumuşak, and T. Eren, "Risk based maintenance in the hydroelectric power plants," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1502, 2019. doi:10.3390/en12081502.

[31] S. Yapıcı, N. Oral, R. Yumuşak ve T. Eren, "Blokzinciri teknolojisi ile merkezi ve dağıtık veri tabanının karşılaştırılması," *Endüstri Mühendisliği*, cilt 32, sayı 3, ss. 457-472, 2021.

[32] S. Yapıcı, R. Yumuşak ve T. Eren, "Çok kriterli karar verme yöntemleri ile medikal depo yeri seçimi" *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 9, sayı 2, ss. 203-221, 2020.

[33] N. Oral, R. Yumuşak ve T. Eren, "AHP ve ANP yöntemleri kullanılarak tehlikeli madde depo yeri seçimi: Kırıkkale ilinde bir uygulama," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 10, sayı 1, ss. 115-124, 2021. doi:10.28948/ngumuh.744734.

- [34] R. Yumuşak, E.C. Özcan, T. Danişan ve T. Eren, "AHP-TOPSIS-tam sayılı programlama entegrasyonu ile hidroelektrik santrallarda bakım strateji optimizasyonu," *Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi*, Şanlıurfa, 10-12 Mayıs 2018, ss. 80-84.
- [35] R. Yumuşak, E.C. Özcan, and T. Eren, "Maintenance strategy optimization with Analytical Hierarchy Process and Integer Programming combination," in *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics – 2019*, Van, 26-28 June, 2019.
- [36] T. L. Saaty, "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process," *Manage. Sci.*, vol. 32, no. 7, pp. 841-855, 1986. doi:10.1287/mnsc.32.7.841.
- [37] T. L. Saaty, "Fundamentals of the analytic network process," in *Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process*, Kobe, Japan, 1999, pp. 12-14.
- [38] K. N. Singh, S. Kushwaha, and F. Hamid, "Analytic Network Process-A review of application areas," In *The 1st IEEE International Conference on Logistics Operations Management, Le Havre, France*, 2012, pp. 17-19.
- [39] M. Dağdeviren, N. Dönmez ve K. Mustafa, "Bir işletmede tedarikçi değerlendirme süreci için yeni bir model tasarımı ve uygulaması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Dergisi*, cilt 21, sayı 2, ss. 247-255, 2006.
- [40] E. C. Özcan, N. A. Özcan ve E. Tamer, "CSP teknolojisine sahip güneş enerjisi santrallerinin kombine ANP-PROMETHEE yaklaşımı ile seçimi," *Başkent Üniversitesi Ticari Bilim. Fakültesi Dergisi*, cilt 1, sayı 1, ss. 18-44, 2017.
- [41] G. Tolga, "PROMETHEE yöntemi ve GAIA düzlemi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Dergisi*, cilt 15, sayı 1, ss. 133-154, 2013.
- [42] M. Dağdeviren ve E. Erarslan, "PROMETHEE sıralama yöntemi ile tedarikçi seçimi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Dergisi*, cilt 23, sayı 1, 2008.
- [43] N. Oral, S. Yapıcı, R. Yumuşak ve T. Eren, "Pandemi sürecinde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için ilaç deposu ve aşı dağıtım merkezi yeri seçimi," *Politek. Dergisi*, (basımda), 2021. doi:10.35674/kent.959000
- [44] E.E. Karsak, S. Sozer, S.E. and Alptekin, (2002), "Product planning in quality function deployment using a combined Analytic Network Process and Goal Programming approach", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 171-190, 2002. doi:10.1016/S0360-8352(02)00191-2

This is an open access article under the CC-BY license



Investigation of Microstructure and Biocompatibility Properties of Ti-16Nb-4Sn Alloy Produced by Powder Metallurgy for Implantation Applications

Ömer Çakmak^a, Mehmet Kaya^{*b}, Ebru Elibol Annac, Mustafa Köm^d

Submitted: 10.07.2021 Revised: 31.08.2021 Accepted: 22.01.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.03

ABSTRACT

Keywords: TiNbSn alloys, Porous biomaterials, Microstructure

^a Pohang University of Science and Technology (POSTECH),
Dept. of Advanced Nuclear Power Engineering,
37673 - POHANG, South Korea
Orcid: 0000-0001-5983-6783

^b Tekirdağ Namık Kemal University,
Çorlu Vocational School,
Depart. of Machinery and Metal Technologies,
59850 - ÇORLU, TEKİRDAĞ, Türkiye
Orcid: 0000-0001-9710-2254

^c Adıyaman University,
Faculty of Medicine,
Department of Histology,
02100 - ADIYAMAN, Türkiye
Orcid: 0000-0001-9726-5846

^d Fırat University,
Faculty of Veterinary Medicine,
Department of Surgery,
23100 - ELAZIĞ, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5026-9559

*Corresponding author:
mehmetkaya75@hotmail.com

Anahtar Kelimeler: TiNbSn Alaşımları, Gözenekli Biyomalzemeler, Mikroyapı

In this study, Ti-16Nb-4Sn ternary alloy was produced as two different porosity by conventional powder metallurgy method. During production, ammonium bicarbonate was used as a volatile additive to increase the porosity. Considering the mass and size dimensions of the samples, the general porosities were determined as 13.62 and 56.32%. Phase analysis and changes in microstructure of sintered samples were examined using XRD, optical microscope, SEM-EDS techniques. In XRD analysis results, it was determined that the structure consisted of β and α phases. As a result of SEM-EDS examinations, it was determined that the structure consisted of two types of morphology: dark grey belonging to α phase and light grey belonging to β phase. The strengths of the samples were examined by performing a uniaxial compression test. As expected, it was determined that the compressive strength of the samples decreased with the increased porosity. Biocompatibility properties of samples with ideal pores in terms of biocompatibility (multi-porous) were examined in vivo using Sprague Dawley female rat. It was determined that there was no toxic and allergic interaction at the implantation site. Thus, it is predicted that the samples can be used as an ideal implant material in terms of biocompatibility.

İmplantasyon Uygulamaları İçin Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti-16Nb-4Sn Alaışımının Mikroyapı ve Biyoyoumluluk Özelliklerinin İncelenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, Ti-16Nb-4Sn üçlü alaşımı iki farklı gözenekli olarak geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile üretildi. Üretim sırasında, gözenek oranının artırılması amacıyla amonyum bikarbonat uçucu katkı malzemesi olarak kullanıldı. Numunelerin kütle ve boyut ölçüleri dikkate alınarak genel gözenek oranları %13.62 ve %56.32 olarak belirlendi. Sinterlenen numunelerin faz analizleri ve mikroyapılarında meydana gelen değişimler; XRD, optik mikroskop, SEM-EDS teknikleri kullanılarak incelendi. XRD analiz sonuçlarında yapının β ve α fazlarından oluştuğu tespit edildi. SEM-EDS incelemeleri sonucunda yapının, α fazına ait koyu gri ve β fazına ait açık gri olmak üzere iki tür morfolojiden oluştuğu tespit edildi. Numunelerin mukavemetleri tek eksenli basma testi yapılarak incelendi. Numunelerin gözenek oranının artması ile beklendiği gibi basma dayanımlarının azaldığı belirlendi. Biyoyoumluluk açısından ideal gözenek olan (çok gözenekli) numunelerin in vivo ortamda biyoyoumluluk özellikleri Sprague Dawley dişi sıçan kullanılarak incelendi. implantasyon bölgesinde toksik ve alerjik etkileşimin olmadığı tespit edildi. Böylece numunelerin biyoyoumluluk açısından ideal bir implant malzemesi olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

1. Giriş (Introduction)

Biyomalzemeler insan vücudunda özellikle diş ve iskelet sistemleri için kullanılmaktadır. Son zamanlarda, ortopedik uygulamalar için plaka, yapay eklem ve vida gibi yük taşıyan implant malzemelerine yönelik artan bir talep vardır. Titanyum (Ti) ve alaşımları, yüksek korozyon direnci, iyi mekanik özellikleri ve yüksek biyoyoumlulukları nedeniyle uzun süredir sert doku implant malzemesi olarak kullanılmaktadır [1-5]. NiTi ve Ti6Al4V gibi Ti-esaslı alaşımlar genellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak vanadyumun toksisitesi, nikel ve alüminyumun vücutta alerjik reaksiyona neden olması nedeniyle vanadyum, nikel ve alüminyum içermeyen implant malzemelerin üretimi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu malzemeler kortikal kemiğe (10–30 GPa) kıyasla çok daha yüksek elastik modülüne ve sertliğe sahiptir. Bu nedenle, kullanım sırasında kemik kaybına ve implantın aşınmasına neden olabilmektedir [6-10]. β -tipi Ti alaşımları, biyomedikal uygulamalarda oldukça avantajlıdır. Bu alaşımlar, β -stabilizatörleri ve daha düşük miktarlarda α -stabilizatörleri içerdiğinden daha düşük bir elastik modüle sahiptir. Bu durum kemik ile implant arasındaki mekanik uyumsuzluğu azaltmaktadır. Literatürde yapılan araştırmaya göre, β -tipi TiNbSn alaşımının Ti6Al4V alaşımına kıyasla deneysel bir modelde daha iyi biyoyoumluluk ve kemik indüksiyon yeteneği sergilediği görülmektedir. Ti-Nb alaşımlarına az miktarda Sn eklemek, bu alaşımların basma dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca, saf Sn'in antibakteriyel özellikler sergilediği ve Ti-Nb alaşımlarına Sn eklenmesinin korozyon dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir [11-14].

Ti-esaslı alaşımlar, mikrodalga sinterleme (MWS), metal enjeksiyon kalıplama, kıvılcım-plazma sinterleme, sıcak izostatik presleme ve geleneksel sinterleme, kendi ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS,) gibi çeşitli toz metalurjisi yöntemleriyle üretilebilmektedir. Geleneksel sinterleme tekniği, düşük işleme maliyeti, gelişmiş difüzyon süreci ve kontrol edilebilir mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle son zamanlarda popüler hale gelmiştir [15-19]. Ti-esaslı alaşımlarda yüksek Nb ve Sn oranlarının sünekliliğe neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca Ti alaşımlarına eklenen düşük oranlarda Nb, Zr ve Sn elementleri çift lamelli faz yapısı oluşturarak alaşımın mukavemetini arttırdığı bilinmektedir [13,20,21]. Bu nedenle, sert doku implantı olarak kullanılmak üzere gözenekli Ti-16Nb-4Sn alaşımı farklı gözeneklerde üretildi. Gözenek oranının numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelendi. Ayrıca çok gözenekli numunelerin in vivo ortamda biyoyoumluluk özellikleri incelenerek ideal implant malzemesi ile karşılaştırıldı.

2. Materyal Metot (Material And Method)

2.1. TiNbSn Alaşımlarının Üretimi (Production of TiNbSn Alloys)

Ti-16Nb-4Sn (% at.) üçlü alaşımını üretmek için, numunelerin üretiminde kullanılan tozlar Alfa Aesar (Almanya) firmasına ait ve yurtiçi alım ile temin edilmiştir. Tozların ve elementlerin bazı özellikleri Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Numune üretiminde kullanılan tozların ve elementlerin bazı özellikler.

Malzeme Özellikleri	Titanyum (Ti)	Niyobyum (Nb)	Kalay (Sn)
Kütle olarak saflık derecesi (%)	99.5	99.8	99.9
Toz boyutu (μm)	-44	-5	-44
Yoğun halde özgül ağırlığı (gr/cm^3)	4.507	8.4	7.31
Atom kütlesi (gr/mol)	47.9	92.9	118.71
Atom numarası	22	41	50
Atom çapı ($\text{\AA}$)	2	2.08	1.45
Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1668	2469	231.93
Kaynama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	3287	4744	2602
Kristal yapıları	Hegzagonal, 882 $^{\circ}\text{C}$ üzeri BCC	Hacim merkezli kübik (BCC)	Tetragonal

Başlangıç olarak, belirli oranlardaki tozlar, homojen bir karışım elde etmek için özel olarak tasarlanmış döner bir kaptan 24 dev/dk ve 12 saat boyunca karıştırıldı. Yapıdaki gözenek miktarını ayarlamak için amonyum bikarbonat (NH_4HCO_3) kullanıldı. Bu kapsamda, iki farklı gözenek miktarına (az ve çok gözenekli numuneler) sahip alaşımlar elde edildi. Az gözenekli numuneler üretmek için, toz karışımı 10 mm çapında ve yaklaşık 15 mm uzunluğunda olacak şekilde 300 MPa basınç ile silindirik olarak preslendi. Daha sonra preslenen numuneler argon gazlı ortamda 5 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında 1200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtıldı ve 2 saat bekletildi. İkinci olarak, çok gözenekli bir yapıya sahip numuneler imal etmek için, Ti-16Nb-4Sn karışımına %30 (ağırlıkça) amonyum bikarbonat (NH_4HCO_3) ilave edilerek

karıştırıldı ve az gözenekli örneklerle aynı boyut ve değerlerde preslendi. Çok gözenekli numuneler için iki aşamalı sinterleme yapıldı. Öncelikle briketlenmiş ham numunelerdeki amonyum bikarbonat yakılarak çok gözenekli bir yapı oluşturmak için 180  C'de 2 saat bekletildi. İkinci sinterleme aşaması, az gözenekli numunelerle aynı değerlere sahiptir. Son olarak, sinterlenmiş numunelerin gözenekliliği, aşağıdaki matematiksel denklemler kullanılarak hesaplandı [21]. Boşluk içermeyen ideal bir kristal yapının teorik yoğunluğu birim hücredeki atom sayısı, atom kütlesi ve birim hücre boyutu dikkate alınarak hesaplanır. İkili veya   l  elementlerle alaşım oluşturma durumunda alaşımın çoğunlukla farklı fazlardan oluşacağı ve oluşacak bazı fazlardaki birim hücrelerin farklı cins atomlar içereceği ve böylece birim hücre boyutunun değişeceği bir gerçektir. Farklı fazlar içeren bir alaşımda fazların tam olarak yüzdelik dağılımlarının bilinmesi ve birim hücrelerdeki atom sayılarının da tam olarak belirlenmesi mümkün olamayacağından birim hücreye ve atom sayısına dayalı teorik yoğunluğun hesaplanması zordur. Bu nedenle teorik yoğunluk hesaplanması yapılırken alaşımın yoğun katı çözeltiden ibaret olduğu düşünülerek aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi genel olarak teorik yoğunluk (ρ_o) her elementin kütlesi ve yoğunluğu dikkate alınarak oluşabilecek karışımın yoğunluğu hesaplanmaktadır. Alaşım durumunda bazı elementlerin atomları farklı cins birim hücre içerisinde yer alabilmesi düşünüldüğünde ve böylece alaşım durumunda numune boyutları da azalacağı için aslında gerçek teorik yoğunluk aşağıdaki denklem ile hesaplanandan daha büyük olacağı bir gerçektir. Numunelerin sinterleme öncesi görünür yoğunlukları dikkate alınmazken sinterleme sonrası üretilen numunelerin nihai yoğunlukları ise numune kütleleri ve silindir numunelerin hacimleri hesaplanarak belirlendi. Burada belirtilen gözenek açık ve kapalı gözeneklerin toplamı olan genel gözenek oranıdır. Ayrıca açık gözenek oranı da hesaplanmak istenirse dereceli bir kap içerisinde numuneler sıvıya daldırılarak (Arşimed prensibi) da hesaplanabilir [20].

$$\rho_o = \frac{m_{Ti} + m_{Nb} + m_{Sn}}{V_{Ti} + V_{Nb} + V_{Sn}} \quad \text{and} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad \varepsilon = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_o}\right) * 100 \quad (1)$$

m = Kütle (gr)

ε = Gözeneklilik miktarı (%)

v = Hacim (cm³)

ρ = ölçülen yoğunluk (gr/cm³)

ρ_o =  zk tle (gr/cm³)

ρ_o = Teorik yoğunluk (gr/cm³)

2.2. Mikroyapı ve Mekanik  zelliklerin  ncelenmesi (Investigation of Microstructure and Mechanical Properties)

Mikroyapısal  zellikler, optik mikroskopi (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) (R ntec EDO donanımlı Evo-40Vp) kullanılarak analiz edildi. Mikroyapısal değişimleri tespit etmek için numunelerin arakesit yüzeyleri 80-2500 mesh'lik silisyum karbür zımpara kağıtlarıyla zımparalandı. Zımparalanmış yüzeyler sırasıyla 5 ve 1 mikrometrelik elmas süspansiyonla parlatıldı. Daha sonra, numunelerin yüzeyleri Kroll solüsyonu (3 mL HF, 6 mL HNO₃ ve 91 mL H₂O) kullanılarak dağlandı. Numunelerin faz analizleri, X-ışını kırınım yöntemi (XRD) (Rigaku Rad-B D-Max 2000) ile Cu-K  radyasyonu kullanılarak ve 6  dk⁻¹ adım hızında 30  ile 80  arasında taranarak yapıldı. Basma test numuneleri EN 24506 standardına göre hazırlandı ve oda sıcaklığında Instron test makinesi kullanılarak basma dayanımları belirlendi.

2.3. Hayvan Deneyleri (Animal Experiments)

Ti-16Nb-4Sn alaşım numunelerinin biyoyumluluk özelliklerinin incelenmesi amacıyla Fırat Üniversitesi Deney Hayvanları Araştırma Merkezi'nden (F DAM) hayvan deneyleri için etik onay (Etik kurul raporu (2016/138)) alındı. Yaklaşık 300 g ağırlığında ve 6 aylık 6 adet Sprague Dawley dişi sıçan biyoyumluluk testleri için kullanıldı. Deney hayvanlarının sol arka bacaklarının kemik dokusuna silindirik şekilli, yaklaşık 2x1 mm boyutunda ve 30 mg ağırlığında çok gözenekli Ti-16Nb-4Sn numuneleri yerleştirildi. Bu çalışmanın implantasyon işlemlerinde, köpek, keçi veya tavşan yerine sıçan tercih edildi. Bunun en büyük nedeni, sıçanlar üzerinde yapılan deneysel çalışmaların daha az zaman ve daha az implant materyali gerektirmesidir [21].

Ameliyat  ncesi hayvanların anestezisi için 1.5 ml/10 kg Rompun (Bayer, Xylazine hidroklorür 23.32 mg/ml) ve yaklaşık 5 dakika sonra 1.5 ml/10 kg intramüsküler Ketals (Park-Davis Ketamin hidroklorür 50 mg/ml) ilaçlar kullanıldı. Implantasyon için sol arka bacağın kaval kemiği seçildikten sonra, deri ve deri altı doku kesildi ve yaklaşık 2 cm uzunluğunda periost açıldı ve kemik korteksi 2.7 mm Steinman iğnesi ile delindi. Delme işlemi sırasında bacağa zarar vermemek için serum kemiğe püskürtüldü.

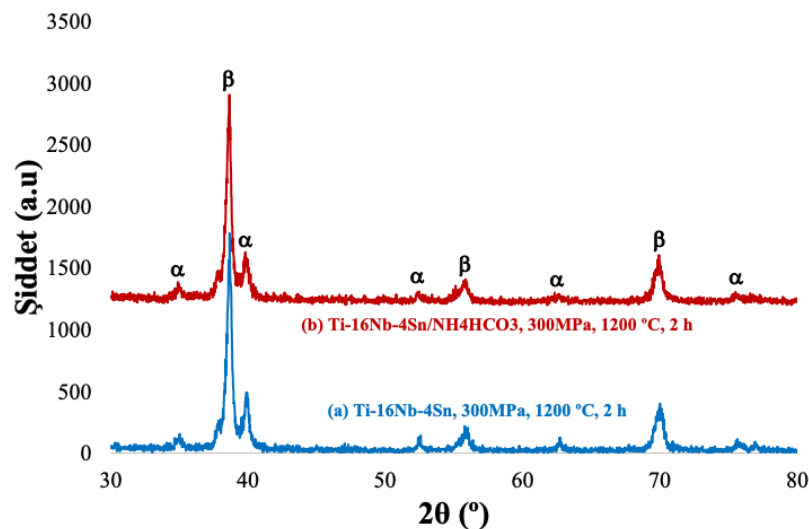
Hazırlanan küçük implantlar, sol arka bacağın kaval kemiğine implante edilmeden önce alkol, serum ve aseton ile temizlendi. İmplantların tibiaya yerleştirilmesinden sonra cerrahi yara, kaslar ve deri altı bağ dokusu 2/0 kromatik katgut ile kapatıldı. Son olarak 1 numaralı ipek iplikle deri dikildi. Bacakları implante edilen hayvanlara antibiyotik ve ağrı kesici uygulanarak 45 gün kontrol altında tutuldu. Ameliyat sonrası hayvanlara 3 gün boyunca, antibiyotik ve ağrı kesici olarak kas içerisine 20 mg/kg cefazolin sodium (cefamezin 500 mg; Eczacıbaşı, İstanbul, Turkey) ve 3 mg/kg ketoprofen (profenid 100 mg; Eczacıbaşı, İstanbul, Turkey) uygulandı. 45 günlük sürenin ardından hayvanlara ötenazi uygulandı ve implantların yerleştirildiği alanlar cerrahi prosedürle dikkatlice çıkarıldı. Alınan tibiadan greftin uygulandığı bölgede kemik parçası çıkarıldı ve koruma için formaldehit solüsyonuna (%10) yerleştirildi [22].

2.4. Histopatolojik Analiz (Histopathological Analysis)

Adıyaman Üniversitesi Tıp Fakültesi Histoloji laboratuvarında histopatolojik analiz yapıldı. Kurban edilen ratlardan alınan kemik örnekleri, 3 gün boyunca %10 nötr formaldehit içinde muhafaza edildi ve daha sonra, dekalsifikasyon için %20 formik asit ve hidroklorik asit karışımı içeren bir çözelti içine alındı. Solüsyonun rejenerasyonu sırasında her 2 günde bir, kemik örnekleri, kireç çözme işleminin tamamlanıp tamamlanmadığını görmek için iğneyle dokunarak kontrol edildi. Bir ay süreyle dekalsifikasyon yapılan kemik dokuları, 12 saat yıkama sonrası dehidrasyon ve şeffaflık ile parafin bloklara gömüldü. Parafine gömülü örnekler, bir mikrotom kullanılarak 5.0 µm kalınlığında seri kesitler halinde kesildi ve alınan kesitler, Hematoksilen-Eosin ve Masson Trichrome boyama kitleri ile boyandı. Histopatolojik analiz için, alınan kesitler ışık mikroskobu (DiaStar, Reichert & Jung Products, Leica, Almanya) kullanılarak analiz edildi ve görüntüler bir dijital kamera (Carl Zeiss Axiocam ERc 5s, Almanya) ile çekildi. Değerlendirmelerde yeni kemik dokusu büyümesi, kemik gövdesinin her tarafında osteoblastik hücre aktiviteleri, damarlanmada varyasyon, bağ dokusunun kollajen lifli bölgesi ve fibroblast hücreleri dikkate alındı [22].

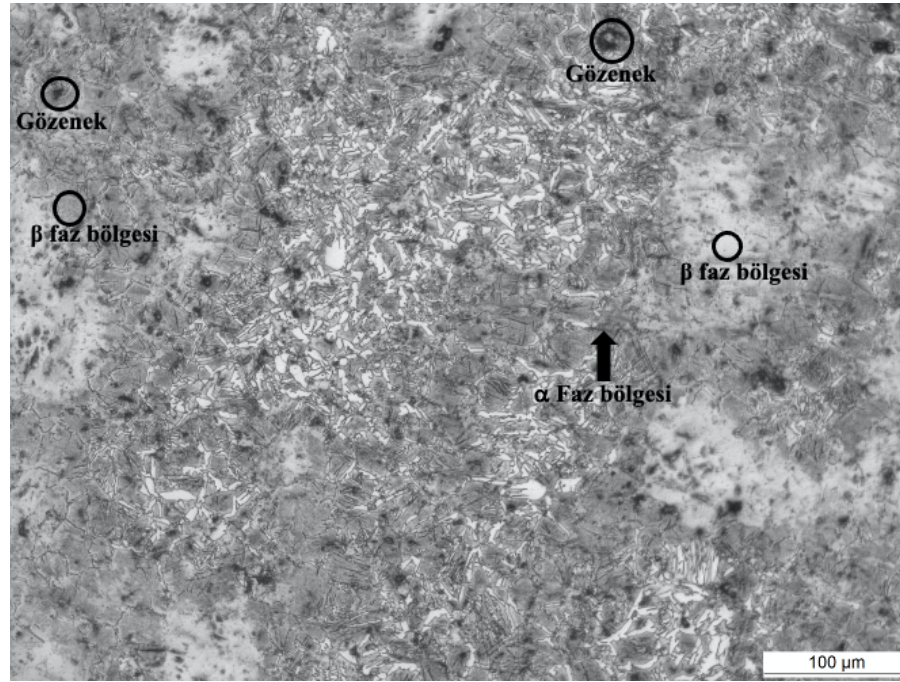
3. Bulgular ve Tartışma (Findings And Discussion)

Numunelerin üretimi deneysel kısımda belirtildiği gibi iki farklı gözenekli (%13.62 az gözenek ve %56.32 çok gözenek) genel gözenekli olacak şekilde argon ortamında sinterlenerek üretildi. Sinterlenen farklı gözenek oranlarına sahip Ti alaşımlarının XRD desenleri Şekil 1'de gösterilmektedir. XRD desenlerinden anlaşılabileceği üzere dominant olan β (yüzey merkezli kübik; fcc) fazının yanı sıra α (hegzagonal sıkı paket; hcp) fazı tanımlandı. Literatürde, toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen Ti-16Nb-XSn (X: ağırlıkça %0,2,4) alaşımlarında da benzer XRD fazlarının varlığı bildirilmiştir [23]. Gözenek oranının Ti-16Nb-4Sn alaşımlarının faz yapısı üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Buna göre, azalan gözenek oranına bağlı olarak pik şiddeti artmaktadır. Bu durum yapının kristalleşme özelliğinin azalan gözenek ile artmasından kaynaklanmaktadır. SEM görüntülerine bakıldığında da bu olay açık bir şekilde görülmektedir.

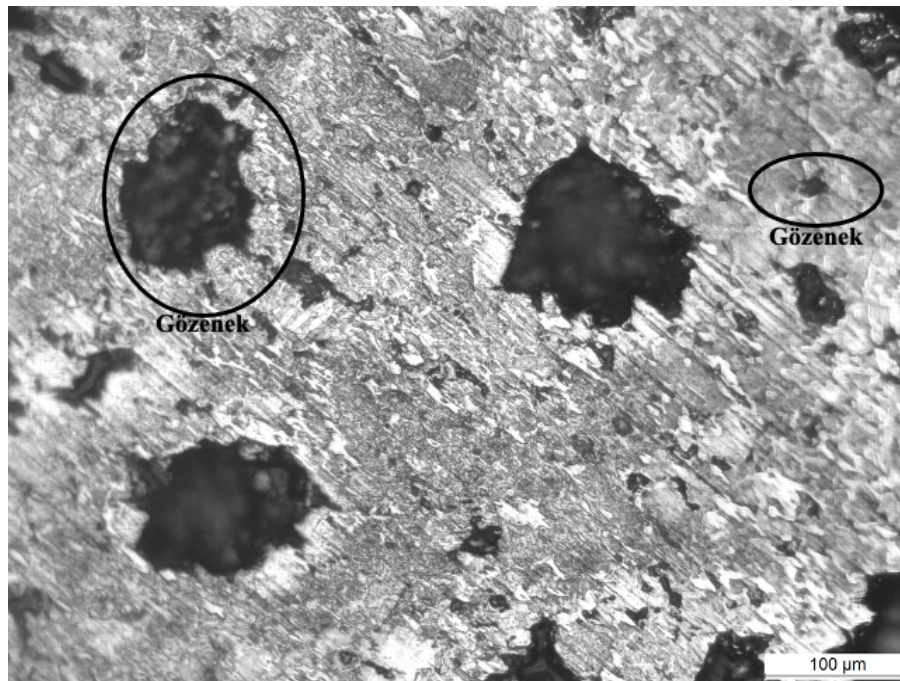


Şekil 1. Ti-16Nb-4Sn numunelerinin X-ışını kırınım modelleri, (a) Az gözenekli numune ve (b) Çok gözenekli numune modelleri (X-ray diffraction patterns of Ti-16Nb-4Sn samples, (a) Less porous sample and (b) Highly porous sample)

Şekil 2'de farklı gözenek oranlarına sahip Ti-16Nb-4Sn alaşımlarının optik görüntüleri görülmektedir. Optik mikroskobu görüntülerindeki siyah bölgeler ki bunların bazıları Şekil 2(a,b) üzerinde belirtildiği gibi gözenekleri göstermekte ve bu gözenekler genel olarak kapalı şekildedir. Yine şekil 2(a) üzerinde belirtildiği gibi açık gri ve koyu gri gibi yapının genel olarak iki farklı fazdan ibaret olduğu anlaşılmaktadır. Bu fazların SEM-EDX ve XRD analizi ile α ve β fazlarına ait olduğu anlaşılmaktadır. Gözenek oranı azaldıkça yapının daha homojen olduğu görülmektedir. Düşük gözenek oranına sahip numunelerde taneciklerin etkileşimi ve difüzyonu daha kolaydır. Bu nedenle partiküller birbirleriyle etkileşerek küçülürler. Ayrıca, alaşımın Optik ve SEM görüntülerinde dubleks mikroyapılar görülmektedir. Çift katmanlı yapılar olarak görülen bu yapılar α ve β fazlarından oluşmaktadır.



(a)



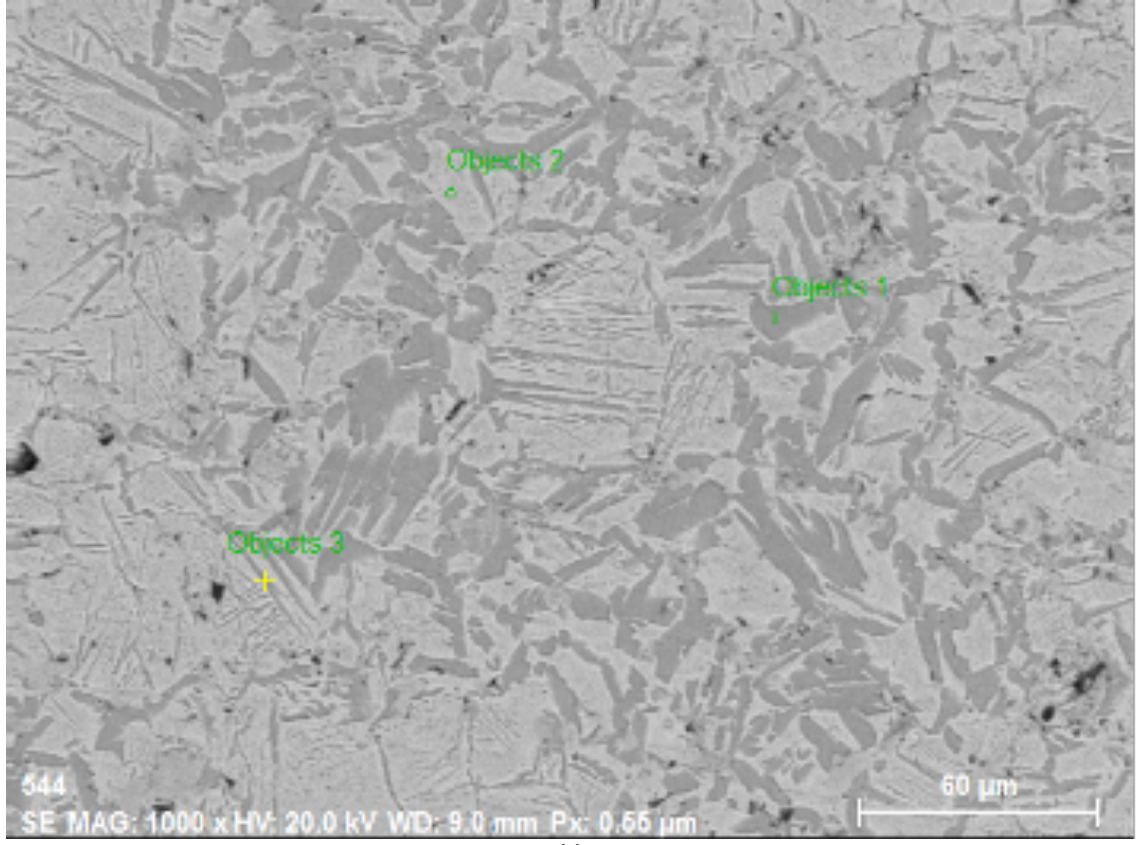
(b)

Şekil 2. Ti-16Nb-4Sn numunelerinin optik mikrografları, (a) Az gözenekli numune ve (b) Çok gözenekli numune
(Optical micrographs of Ti-16Nb-4Sn samples, (a) Less porous sample) and (b) Highly porous sample)

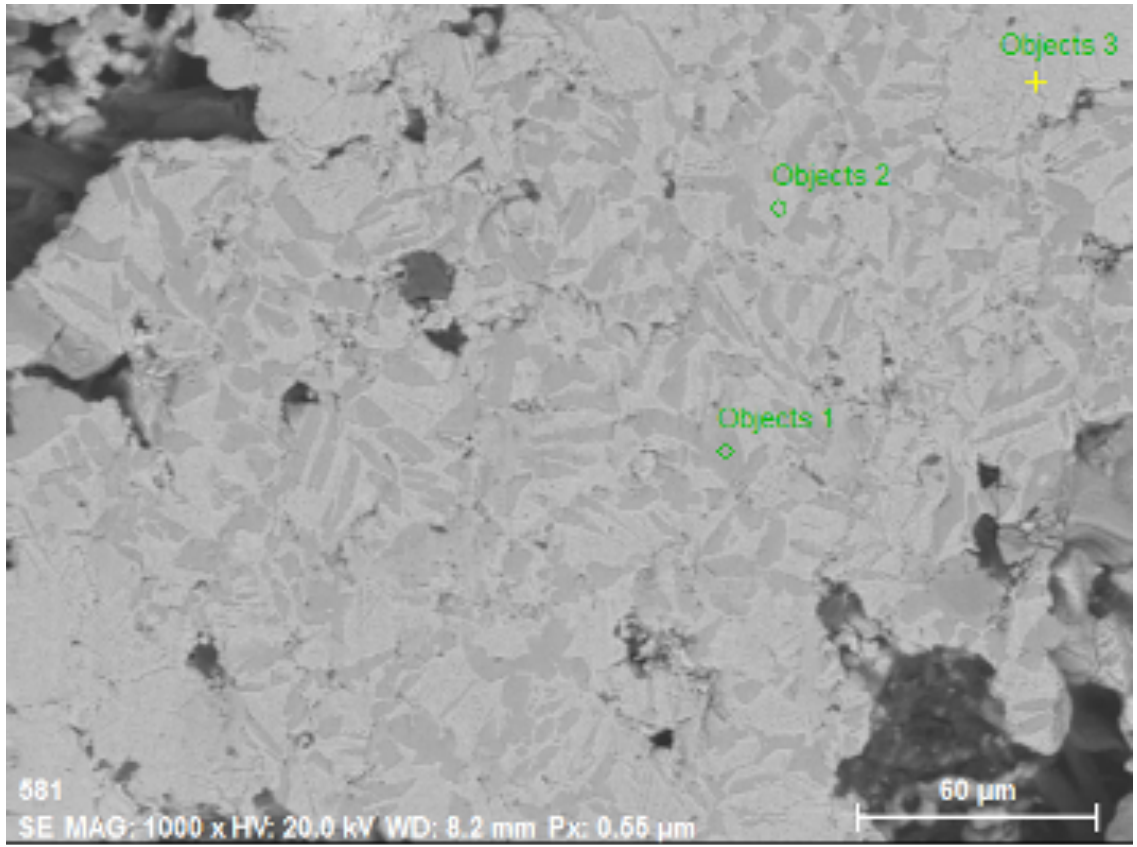
Şekil 3 (a) ve (b) 'de gösterildiği gibi farklı gözenek oranı ile üretilen Ti-6Nb-4Sn alaşımlarının mikro morfolojisi SEM kullanılarak incelenmiştir. SEM görüntülerinde açık gri ve koyu gri renkli benzer yapıların varlığı ve siyah renkli gözeneklerin varlığı dikkat çekmektedir. İkili Ti-Nb denge diyagramına göre Ti-16Nb atomik oranı dikkate alındığında sinterleme işlemi sırasında sıvı fazın oluşması mümkün olmayıp katı-durum sinterleme işlemi söz konusudur. Benzer şekilde ikili Ti-%4Sn veya Nb-%4Sn atomik oranları dikkate alındığında 1200 °C'de katı-durum sinterlemesi beklenir ancak kalayın ergime sıcaklığı çok düşük olduğundan daha düşük sıcaklıklarda atomik difüzyon neticesi ile farklı intermetalik bileşikler olabilir. Bu durum sinterleme sıcaklığına ulaşmak için ısıtma hızının yeterince düşük (< 5 °C/dakika) tutulması ile belki önlenabilir, aksi durumda sıvı-faz sinterleme işlemi gerçekleşmiş olur ve böylece daha düşük ötektik ergime sıcaklıklarında yarı kararlı intermetalik fazlar oluşur.

Sinterleme sıcaklığının artması durumunda sıvı-faz sinterlenmesi neticesi ile atomik difüzyonun daha kolay olmasından kaynaklı düşük sıcaklıklarda oluşan yarı kararlı fazların çoğunluğu ve sinterleme süresinin fazla olması durumunda hepsi kaybolur. Toz metalürjisi ile üretilen gözenekli numunelerde sıvı faz sinterlemesi durumunda gözeneklerin çoğu büzülerek numuneler yoğunlaşır. Ergime neticesi ile numunelerin yoğunlaşması durumu toz karışımı içerisinde gözenek yapıcı malzeme kullanılmaması durumunda daha belirgin olur. Sinterleme sıcaklığının artması neticesi ile düşük sıcaklıklarda oluşan yarı kararlı fazların kaybolması esnasında ilk önce σ fazı ve sonra matrisin titanyum olması neticesi ile β fazı oluşabilir. Nb atomlarının Ti matrisi içerisinde kolay difüzyona uğrayabilmesi için sinterleme sıcaklığı yeterince arttırılırsa β fazı oluşur. Zhao ve ark. [24] tarafından yapılan bir çalışmada 900-1100 °C sinterleme sıcaklığının β fazının oluşması için yeterli olmadığı belirtilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda sinterleme ile oluşan β fazı numunenin soğuması durumunda çözünmeye başlar ve tane sınırlarında σ fazının oluşması beklenir. Böylece σ ve β fazlarının bir arada olması sonucu Widmanstatten lamelli yapı oluşur ki bu durumda numunelerin mekanik dayanımı artar. SEM görüntülerine bakıldığı zaman bazı bölgelerde σ ve β fazlarının lamelli yapısının (Widmanstatten yapısı) olduğu görülmektedir. Benzer görüntüler Yılmaz ve ark. [23] tarafından 1200 °C de sinterlenme ile üretilen gözenekli Ti-16Nb-4Sn alaışımının SEM görüntülerinden de belirtilmektedir. Xie ve ark. [25] tarafından plazma sinterleme yöntemiyle üretilen %7.1, %30, %40, %50 ve %60 gözenekliliğe sahip $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{10}\text{Cu}_{31}\text{Pd}_{10}\text{Sn}_4$ alaşım numunelerinin SEM incelemesinde de benzer sonuçlar belirtilmektedir. Ayrıca, gözenek oranı azaldıkça lamel kalınlığının da azaldığını ve iğne benzeri morfolojilerin oluştuğunu belirtmektedirler.

SEM görüntülerinde farklı bölgelerden alınan Object-1, Object-2 ve Object-3 olarak gösterilen detaylı EDS sonuçları Tablo-2'de gösterilmektedir. Az ve çok gözenekli numunelerin yapıları esas olarak iki fazdan oluşmaktadır. İlk olarak, object-1 (elips) ve object-3 (nokta) olarak gösterilen koyu gri bölgeler α -fazına aittir. İkinci olarak, açık gri ve daha geniş şekilde görünen bölgeler (object-2) ise β -fazına aittir. Object-1 ve object-3 aynı faz (α -fazı) olmasına rağmen farklı bölgelerde alındığı için niyobyum atomik oranlarında belirgin farklılıklar vardır. Bunun nedeni tam olarak anlaşılmamakla birlikte, kalayın ergime sıcaklığının düşük olması neticesi ile düşük sıcaklıkta yarıkararlı intermetalik fazların oluştuğu ve zamanla sıcaklığın artması sonucu niyobyum içerikli yarıkararlı fazların kaybolarak niyobyum ağırlıklı α -fazının oluştuğu ve böylece ince koyu α -lamellerin oluştuğu düşünülmektedir. Çünkü XRD desenlerinde sadece α ve β fazları bulunmaktadır. Benzer SEM-EDS analizi sonuçları İbrahim ve ark. [26] tarafından mikrodalga sinterleme (MDS) yöntemi ile üretilen Ti-16Nb-XSn (% X: 0, 0.25, 0.5, 1.5) örneklerinde de belirtilmektedir. Ayrıca, Li ve ark. [27] tarafından ark ergitme yöntemiyle üretilen $\text{Ti}_{85-x}\text{Nb}_{10+x}\text{Sn}_5$ ($x=0,3,6,10\%$ at.) örneklerde de benzer mikroyapılar gösterilmektedir. Ergitme ile üretilen TiNbSn numunelerinde hızlı soğuma sonucu α ve β fazlarına ilaveten α' (hegzagonal martensit) ve α'' (ortorombik martensit) fazlarının da oluştuğu bazı çalışmalarda belirtilmektedir [28].



(a)



(b)

Şekil 3. Ti-16Nb-4Sn numunelerinin SEM mikrografları, (a) Az gözenekli ve (b) çok gözenekli numune
(SEM micrographs of Ti-16Nb-4Sn samples, (a) Less porous sample and (b) Highly porous sample)

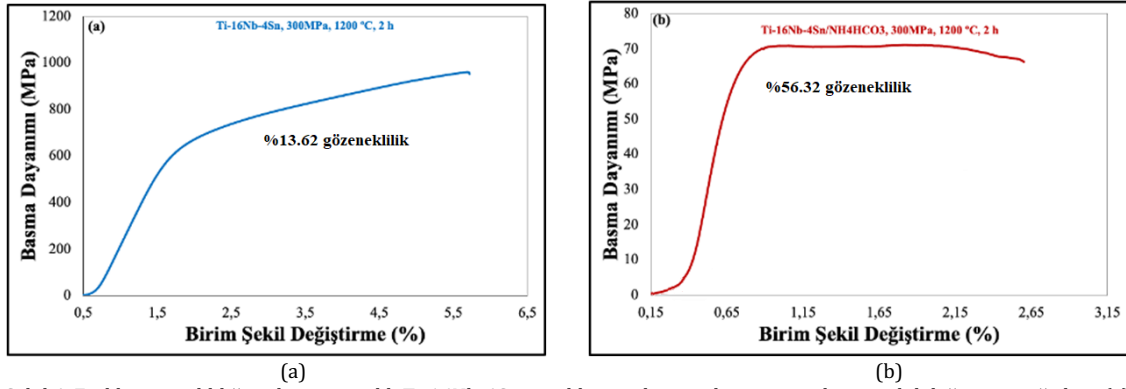
Tablo 2. EDX analizi sonucunda farklı bölgelerden alınan ağırlık ve atomik oranlar
(Weight and atomic ratios taken from different regions as a result of EDX analysis)

	Elementler	% Kütle (Az gözenekli) (a)	% Atomik (Az gözenekli) (a)	% Kütle (Çok gözenekli) (b)	% Atomik (Çok gözenekli) (b)
<i>Objects-1 (elips)</i>	Ti	88.33	94.31	86.32	93.56
	Nb	6.10	2.63	8.37	3.65
	Sn	5.57	3.07	5.01	2.79
<i>Objects-2 (elips)</i>	Ti	70.69	83.26	69.20	82.13
	Nb	21.31	12.93	23.53	14.39
	Sn	8.01	3.80	7.27	3.48
<i>Objects-3 (nokta)</i>	Ti	78.01	88.07	82.37	90.66
	Nb	15.18	8.83	12.28	6.96
	Sn	3.10	3.10	5.35	2.38

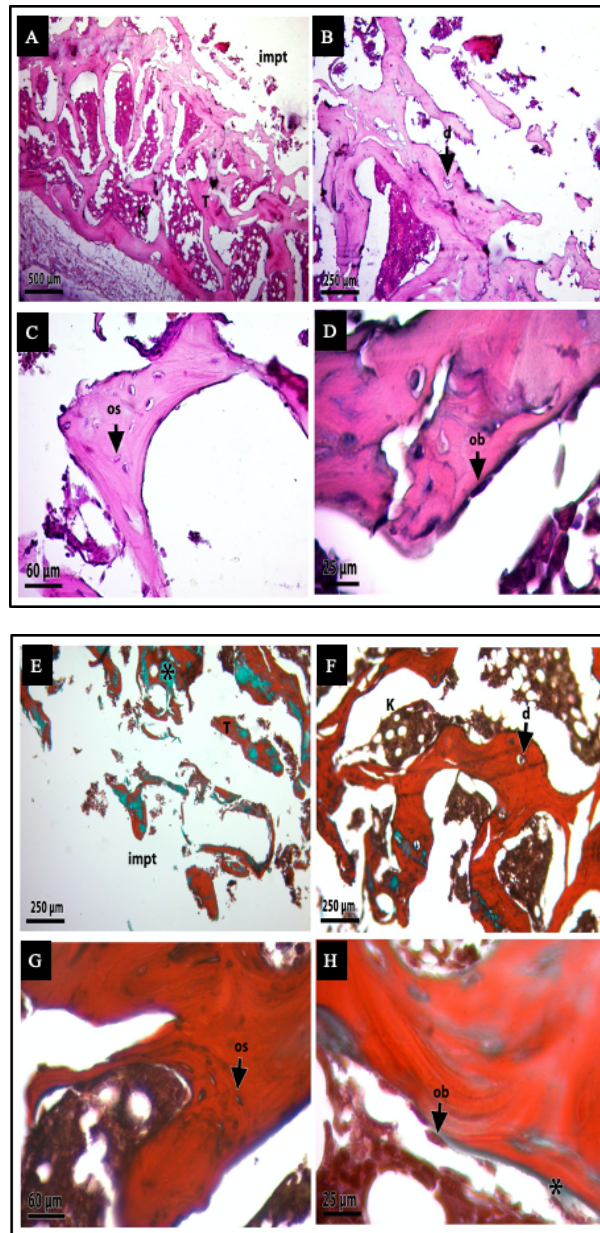
Mikroyapıda gözenek oranı ve fazların morfolojisi mekanik özellikleri etkileyen iki önemli faktördür. Bu kapsamda, numunelerin mekanik davranışını değerlendirmek için basma deneyi testleri yapılmıştır. Metalik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için genel olarak basma-çekme, mikrosertlik, aşınma, bükme ve yorulma gibi testlerin bir veya birkaçı numune durumlarına göre uygulanır. Ancak gözenekli numunelerde mikrosertlik ve aşınma testlerinin uygulanması ve sağlıklı sonuç alınması numunelerdeki gözeneklerin varlığı nedeniyle zordur. Bu çalışmada üretilen numuneler gözenekli ve implant malzemesi olarak kullanılmaları amaçlandığından vücut ortamında basma dayanımına maruz kalacakları için basma testleri ile mekanik dayanımları belirlenmeye çalışıldı. Numunelerin basma testi için olması gereken kesit ve boy oranında silindir numunelerde numune uzunluğunun kesitin en az 1.5 katı olacak şekilde (10x15 mm silindir) olmasına özen gösterilmiştir. Test esnasında basma basıncına karşı birim şekil değiştirme hızının 0.01 mm/saniye 0.1 mm/dakika olmasına özen gösterilmiştir. Az ve çok gözenekli numunelerin basma dayanımı-birim şekil değiştirme grafikleri şekil 6'da verilmiştir. 1200 °C'de 2 saat sinterlenen az gözenekli (%13.62) numunenin basma dayanımı ve birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 960 MPa ve %5.7 iken, bu değerler çok gözenekli (%56.32) numuneler için 70 MPa ve %2.7'dir. Bu sonuçlara göre gözenek oranının artması ile beklenildiği gibi numunenin basma dayanımının azaldığı anlaşılmaktadır. Gözenekli TiNbSn alaşımları için sinterleme sıcaklığının artması ile gözenek oranının azaldığı ve azalan gözenek oranı ile basma dayanımlarının arttığı daha önceki çalışmamızda da belirtilmektedir [29]. Sert doku için ideal implant malzemelerinin gözenek oranları %30'lardan başlamaktadır. İnsan kemiğinin gözenek oranı ise %30-%90 arasındadır. Ayrıca, gözenek boyutları ise 100 µm ila 500 µm arasındadır [18,20,30].

Çok gözenekli Ti-16Nb-4Sn alaşım numunesinin in vivo değerlendirme sonucu şekil 5'de gösterilmektedir. Bu sonuca göre implant materyali etrafındaki bölgelerde yabancı cisim reaksiyonu veya belirgin alerjik reaksiyon görülmemektedir. Bu bölgelerde damarlanmanın arttığı ve yeni kemik dokusunun implanta doğru ilerlediği görülmektedir. Kortikal kemik yıkımına dair bir kanıt olmamakla birlikte periostler, kemik dokunun dışında varlığını sergilemektedir. Ayrıca osteositler ve kemik doku hücreleri normal görünümündedir. Osteoblastik aktivitenin yer yer devam ettiği ve kemik trabeküllerinin etrafında yeni kemik oluşumu için matrisi sentezlediği görülmektedir. Kunii ve ark. [31] ve Tanaka ve ark. [32] tarafında sırasıyla Ti-25.4Nb-9.9Sn (kütle%) ve Ti-25Nb-11Sn (ağırlıkça%) alaşım numuneleri kullanılarak yapılan in vivo çalışmalarında benzer sonuçlar belirtilmektedir.

Gözenekli implant malzemeleri, implant numunesinin yapısındaki gözeneklerin oksijen ve besinlerin taşınmasını kolaylaştırmasından dolayı düşük gözenekli muadillerine kıyasla cerrahi amaçlar için avantajlıdır. Takemoto ve ark. [33] plazma püskürtme yöntemiyle ürettikleri farklı gözenek oranlarına sahip saf Ti implant numuneleri ile yaptıkları in vivo deneyler sonucunda gözenek oranı arttıkça numunelerin biyouyumluluk özelliklerinin arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca, Taniguchi ve ark. [34] tarafından farklı gözenek boyutuna sahip Ti implant malzemeleri üzerine yapılan in vivo çalışmalarda gözenek boyutunun artmasıyla kemik büyümesinin daha hızlı olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde, Van ve ark. [35] tarafından gözenek boyutu 500 µm ve 1000 µm olarak üretilen Ti6Al4V implant numunelerinin in vitro deney sonuçlarına göre gözenek boyutunun artmasıyla birlikte hücre yoğunluğunda ve metabolik aktivitede önemli bir artış olduğu belirtilmektedir. Çok gözenekli Ti-16Nb-4Sn alaşımı iyi biyoaktivite ve mükemmel biyouyumluluk sergilemektedir. Bu özelliklerinden dolayı bu implant malzemelerin cerrahi koşullar için biyolojik olarak kullanılma potansiyelleri vardır.



Şekil 4. Farklı gözenekliliğe sahip gözenekli Ti-16Nb-4Sn örneklerinin basma dayanımı ve birim şekil değiştirme eğrileri, (a) %13.62 gözeneklilik, (b) %56.32 gözeneklilik
(Compressive strength and strain curves of porous Ti-16Nb-4Sn samples with different porosity): (a) 13.62% porosity (b) 56.32% porosity)



Şekil 5. Çok gözenekli Ti-16Nb-4Sn örneğinin implantasyondan sonraki histolojik görüntüsü. (A)-(D): Hematoksilin ve Eosin boyama; (E)-(H): Trikróm boyamanın Masson-Goldner görüntüleri (A, E x4; B, F x10; C, D, G ve H x40 büyütme). impt: İmplant bölgesi, T: kemik trabekülleri, K: kemik iliği, d: vasküler, os: osteosit, ob: osteoblast, *: yeni kemik oluşumu
(Histological image of the multiporous Ti-16Nb-4Sn specimen after implantation. (A)-(D): Hematoxylin and Eosin staining; (E)-(H): Masson-Goldner images of trichrome staining (A, E x4; B, F x10; C, D, G and H x40 magnifications). impt: Implant site, T: bone trabeculae, F: bone marrow, d: vascular, os: osteocyte, ob: osteoblast, *: new bone formation)

4. Sonuç ve Öneriler (Result and Recommendations)

Biyouyumluluk açısından az gözenekli ve ideal gözenekli (çok gözenekli) Ti-16Nb-4Sn alaşımları, sert doku implantı olarak kullanılmak üzere geleneksel toz sinterleme yöntemiyle üretilmektedir. SEM görüntülerinde açık gri ve koyu gri renkli olarak iki farklı yapıya ilaveten siyah renkli olarak gözeneklerin varlığı anlaşılmaktadır. SEM görüntülerinde EDX analizi sonucu bazı bölgelerde σ ve β fazlarının lamelli yapısının (Widmanstatten yapısı) varlığı dikkat çekmektedir. SEM-EDX analizlerine ilaveten XRD analiz sonuçlarında da yapının β ve α fazlarından oluştuğu tespit edildi. Çok gözenekli Ti-16Nb-4Sn alaşım numunesinin daha düşük mukavemete ve eğrilerde uzun bir plato alanına sahip olduğu görüldü. Çok gözenekli numunelerin basma dayanımı kemik yapısına göre daha düşüktür. Bu nedenle gözenek oranının %56.32'den daha aşağılara düşürülmesi ve böylece basma dayanımının artırılması gerekmektedir. İn vivo test sonuçlarına göre, fibröz bağ doku oluşumu ve implant örneği etrafında yeni kemik oluşumu iyi durumdadır. Üretilen numuneler biyolojik uyumluluklarından dolayı implant malzemesi olarak kullanılabilir için yüksek potansiyele sahiptir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: MÜFLTP/2017-0001). Destekleri için Adıyaman Üniversitesine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict Of Interest Statement)

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar (References)

- [1] I. V. Okulov, A.V. Okulov, I.V. Soldatov, B. Luthringer, R. Willumeit-Römer, T. Wada, H. Kato, J. Weissmüller and J. Markmann, "Open porous dealloying-based biomaterials as a novel biomaterial platform," *Materials Science and Engineering C*, vol. 88, pp. 95-103, March 2018. doi:10.1016/j.msec.2018.03.008
- [2] A. E. Medvedev, A. Molotnikov, R. Lapovok, R. Zeller, S. Berner, P. Habersetzer and F.D. Torre, "Microstructure and mechanical properties of Ti-15Zr alloy used as dental implant material," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 62, pp. 384-398, September 2016. doi:10.1016/j.jmbbm.2016.05.008
- [3] R.P. Verma, "Titanium based biomaterial for bone implants: A mini review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 3148-3151, June 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.649
- [4] P. Xu, F. Pyczak, M. Yan, W. Limberg, R. Willumeit-Römer and T. Ebel, "Tensile toughening of powder-injection-molded β Ti-Nb-Zr biomaterials by adjusting TiC particle distribution from aligned to dispersed pattern," *Applied Materials Today*, vol. 19, pp. 1-14, June 2020. doi:10.1016/j.apmt.2020.100630
- [5] M. Vardaki, S. Mohajernia, A. Pantazi, I.C. Nica, M. Enachescu, A. Mazare, I. Demetrescu and P. Schmuki, "Post treatments effect on TiZr nanostructures fabricated via anodizing," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 6, pp. 5802-5812, December 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.049.
- [6] L. Frauchiger, M. Taborrelli and P. Descouts, "Structural characterization of Ti₉₀Al₆V₄ alloy and sulphur segregation," *Applied Surface Science*, vol.115 (3), pp. 232-242, July 1997. doi: 10.1016/S0169-4332(96)01019-7
- [7] M. Niinomi, M. Nakai and J. Hieda, "Development of new metallic alloys for biomedical applications," *Acta Biomaterial*, vol. 8, pp. 3888-3903, November 2012. doi:10.1016/j.actbio.2012.06.037
- [8] C. Pengfei, J. Ran, Z. Fenggang, L. Jianghua and F. Tian, "Mechanical properties and corrosion behavior of b-type Ti-Zr-Nb-Mo alloys for biomedical application," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 842, pp. 155693, November 2020. doi:10.1016/j.jallcom.2020.155693
- [9] J.-Y. Rho, T.Y. Tsui and G.M. Pharr, "Elastic properties of human cortical and trabecular lamellar bone measured by nanoindentation," *Biomaterial*, vol. 18, pp. 1325-1330, October 1997. doi:10.1016/S0142-9612(97)00073-2.
- [10] S. Ozan, J.X. Lin, Y.C. Li, R. Ipek and C.E. Wen, "Development of Ti-Nb-Zr alloys with high elastic admissible strain for temporary orthopedic devices," *Acta Biomaterial*, vol. 20, pp. 176-187, July 2015. doi:10.1016/j.actbio.2015.03.023.
- [11] T.K. Jung, H.S. Lee, S. Semboshi, N. Masahashi, T. Abumiya and S. Hanada, "Mechanical properties graded Ti alloy implants for orthopedic applications," *Materials Science Forum*, vol. 631(632), pp. 205-210, January 2010. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.631-632.205
- [12] T.K. Jung, S. Semboshi, N. Masahashi and S. Hanada, "Mechanical properties and microstructures of beta Ti-25Nb-11Sn ternary alloy for biomedical applications," *Materials Science and Engineering C*, vol. 33, pp. 1629-1635, April 2013.

doi:10.1016/j.msec.2012.12.072

[13] K. Miura, N. Yamada, S. Hanada and T.K. Jung, "The bone tissue compatibility of a new Ti-Nb-Sn alloy with a low Young's modulus," *Acta Biomaterial*, vol. 7, pp. 2320–2326, May 2011. doi:10.1016/j.actbio.2011.02.008

[14] E. Yılmaz, A. Gökçe, F. Findik and H.O. Gülsoy, "Powder metallurgy processing of Ti-Nb based biomedical alloys," *Acta Physica Polonica A*, vol. 134, pp. 278–280, 2018. doi:10.12693/APhysPolA.134.278

[15] O. R.M. Khalifa, E. Wahab and A. Tilp, "The effect of Sn and TiO₂ nano particles added in electroless Ni-P plating solution on the properties of composite coatings," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5(6), pp. 136–144, 2011.

[16] X. Rao, C.L. Chun and Y.Y. Zheng, "Phase composition, microstructure, and mechanical properties of porous Ti-Nb-Zr alloys prepared by a two-step foaming powder metallurgy method," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 34, pp. 27–36, June 2014. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.02.001

[17] P.E.L. Moraes, R.J. Contieri, E.S.N. Lopes, A. Robin and R. Caram, "Effects of Sn addition on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti-Nb-Sn alloys," *Materials Characterization*, vol. 96, pp. 273–281, October 2014. doi:10.1016/j.matchar.2014.08.014

[18] M. Kaya, A. Yolun, O. Çakmak, F. Yakuphanoglu, E. Elibol, M. Köm ve M. Güvenç, "Biyomedikal uygulamalar için titanyum esaslı gözenekli TiNb alaşımının üretimi," *Nevşehir Bilim Teknoloji Dergisi*, cilt 7, ss. 49-59, 2018. doi:10.17100/nevbitlek.417354

[19] M. Kılıç, "Toz metalürjisi ile üretilen NiTi alaşımına Al'un etkisi", *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 10(1), ss. 256-267, 2021. doi:10.17798/bitlisfen.841400

[20] M. Kaya and F. Yakuphanoglu, "A study on microstructure of porous TiNbZr alloy produced as biomaterial," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 50, pp. 742–746, 2019. doi:10.1002/mawe.201800235

[21] M. Kaya, F. Yakuphanoglu, E. Elibol and M. Köm, "Microstructure characterization and biocompatibility behaviour of TiNbZr alloy fabricated by powder metallurgy," *Materials Research Express*, vol. 6, pp. 1–12, 2019. doi:10.1088/2053-1591/ab58a5.

[22] Ö. Çakmak, "TiNbSn alaşımının toz metalürjisi ile üretimi ve biyouyumluluk özelliğinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye 2017.

[23] E. Yılmaz, A. Gökçe, F. Findik and H.O. Gülsoy, "Characterization of biomedical Ti-16Nb-(0-4)Sn alloys produced by Powder Injection Molding," *Vacuum*, vol. 142, pp. 164–174, August 2017. doi:10.1016/j.vacuum.2017.05.018

[24] D. Zhao, K. Chang, T. Ebel, H. Nie, R. Willumeit and F. Pyczak, "Sintering behavior and mechanical properties of a metal injection molded Ti-Nb binary alloy as biomaterial," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 640, pp. 393–400, August 2015. doi:10.1016/j.jallcom.2015.04.039

[25] G. Xie, H. Kanetaka, H. Kato, F. Qin and W. Wang, "Porous Ti-based bulk metallic glass with excellent mechanical properties and good biocompatibility," *Intermetallics*, vol. 105, pp.153–162, February 2019. doi: 10.1016/j.intermet.2018.12.002

[26] M.K. Ibrahim, E. Hamzah and S.N. Saud, "Microstructure, phase transformation, mechanical behavior, bio-corrosion and antibacterial properties of Ti-Nb-xSn (x = 0, 0.25, 0.5 and 1.5) SMAs," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, pp. 382–393, November 2018. doi:10.1007/S11665-018-3776-X

[27] P. Li, X. Ma, D. Wang and H. Zhang, "Microstructural and mechanical properties of β -Type Ti-Nb-Sn biomedical alloys with low elastic modulus," *Metals*, vol. 9, pp. 1–16. June 2019. doi:10.3390/met9060712

[28] J. Sun, Q. Yao, H. Xing and W.Y. Guo, "Elastic properties of β , α' and ω metastable phases in Ti-Nb alloy from first-principles," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 19, pp. 1–8, 2007. doi:10.1088/0953-8984/19/48/486215

[29] Ö. Çakmak and M. Kaya, "Effect of sintering procedure on microstructure and mechanical properties of biomedical TiNbSn alloy produced via powder metallurgy," *Applied Physics A*, vol. 127, pp. 561–570, June 2021. doi:10.1007/s00339-021-04678-4

[30] A. Nouri, P.D. Hodgson and C.E. Wen, "Effect of process control agent on the porous structure and mechanical properties of a biomedical Ti-Sn-Nb alloy produced by powder metallurgy," *Acta Biomaterials*, vol. 6, pp. 1630–1639, April 2010. doi:10.1016/j.actbio.2009.10.005

[31] T. Kunii, Y. Mori, H. Tanaka, A. Kogure, M. Kamimura, N. Mori, S. Hanada, N. Masahashi and E. Itoi, "Improved osseointegration of a TiNbSn alloy with a low Young's modulus treated with anodic oxidation," *Science Report*, vol. 9, pp. 1–10, September 2019. doi:10.1038/s41598-019-50581-7.

[32] H. Tanaka, Y. Mori, A. Noro, A. Kogure, M. Kamimura, N. Yamada, S. Hanada, N. Masahashi and E. Itoi, "Apatite formation and biocompatibility of a low Young's modulus Ti-Nb-Sn alloy treated with anodic oxidation and hot water. *PLoS One*, vol. 11(2), pp. 1–14, February 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0150081

[33] M. Takemoto, S. Fujibayashi, M. Neo, J. Suzuki, T. Kokubo and T. Nakamura, "Mechanical properties and osteoconductivity of porous bioactive titanium," *Biomaterials*, vol. 26, pp. 6014–6023, October 2005. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.03.019

[34] N. Taniguchi, S. Fujibayashi, M. Takemoto, K. Sasaki, B. Otsuki, T. Nakamura, T. Matsushita, T. Kokubo and S. Matsuda, "Effect

of pore size on bone ingrowth into porous titanium implants fabricated by additive manufacturing: an in vivo experiment,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 59, pp. 690–701, February 2016. doi:10.1016/j.msec.2015.10.069

[35] S. V. Bael, Y.C. Chai, S. Truscetto, M. Moesen, G. Kerckhofs, H.V. Oosterwyck, J.P. Kruth and J. Schrooten, “The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds,” *Acta Biomaterials*, vol. 8, pp. 2824–2834, July 2012. doi:10.1016/j.actbio.2012.04.001

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Performing of Reptile Robot Prototype with Radio Frequency Remote Control for the Exploration After the Earthquake Ruins

Kemal Kedikli^a, Bayram Yıldız^b, Kenan Toka^c, Abdullah Genç^{*d}

Submitted: 13.10.2021 Revised: 21.02.2022 Accepted: 07.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.05

ABSTRACT

Keywords: Reptilian robot, Additive manufacturing, Radio frequency, Arduino

^a Isparta University of Applied Sciences,
Faculty of Technology,
Dep.of Mechatronics Engineering
32100 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2087-2407

^b Isparta University of Applied Sciences,
Faculty of Technology,
Dep.of Mechatronics Engineering
32100 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2024-5668

^c Isparta University of Applied Sciences,
Faculty of Technology,
Dep.of Mechatronics Engineering
32100 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3554-031X

^d Isparta University of Applied Sciences,
Faculty of Technology,
Dep.of Mechatronics Engineering
32100 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7699-2822

*Corresponding author:
abdullahgenc@isparta.edu.tr

Time is very significant for living things that are left under the rubble after earthquakes. With this study, a prototype design has been made that will accelerate the debris search and rescue activities and inform the search teams about the debris in advance. This prototype design is inspired by reptiles and consists of parts comprising of five different modules. These modules are designed small in structure, allowing the robot to easily pass through narrow spaces. The prototype is remotely controlled by radio frequency. By using to the FPV camera in front of the first module, the view from a distance and the sensors in the tail are transmitted to the screens on the control of the gas, temperature, and humidity in the environment. It can move forward and backward thanks to the motors in the prototype modules. With the servo motors located between the modules, the robot can be moved to the right, left, up, and down, avoiding obstacles and climbing on them. The controls of the components used are provided by Arduino Nanos and codes created specifically for the robot. The production of the parts is made of PLA material using different designs by additive manufacturing. In addition to earthquake debris, it can be used in the preliminary exploration of areas that are risky to enter and may endanger human life, especially in military applications.

Deprem Enkazı Sonrasında Keşif için Radyo Frekansıyla Uzaktan Kontrollü Sürünge Robot Prototipinin Gerçekleştirilmesi

ÖZ

Depremler sonrası enkaz altında kalan canlılar için zaman çok önemlidir. Bu çalışma ile enkaz arama kurtarma faaliyetlerini hızlandıracak, arama ekiplerini enkaz hakkında önceden bilgilendirebilecek bir prototip robot tasarımı yapılmıştır. Bu prototip tasarımı sürünge robotlardan ilham alınmış ve modül adı verilen kısımlardan oluşmaktadır. Bu modüller yapı olarak küçük tasarlanarak robotun dar alanlardan rahatlıkla geçmesi sağlamaktadır. Prototip radyo frekansıyla uzaktan kumanda edilmektedir. İlk modülün önünde bulunan FPV kamera sayesinde uzak mesafeden görüntü ve kuyruk içerisinde bulunan sensörler sayesinde ortamdaki gaz, sıcaklık ve nem bilgisi kumanda üzerinde bulunan ekranlara iletilmektedir. Prototip modüllerinin içerisinde bulunan motorlarla ileri ve geri hareket edebilmektedir. Modüller arasında bulunan servo motorlar ile robotun sağ, sol, yukarı ve aşağıya hareket ettirilerek engellerden kaçmakta, üzerlerine tırmanabilmektedir. Kullanılan bileşenlerin kontrolleri Arduino Nano ve robota özgü oluşturulan kodlar ile sağlanmaktadır. Parçaların üretimi eklemeli imalatla PLA malzemeden farklı tasarımlar kullanılarak imal edilmiştir. Ayrıca, deprem enkazının yanı sıra, özellikle askeri uygulamalarda girilmesi riskli ve insan hayatını tehlikeye atabilecek bölgelerin ön keşfinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Sürünge robot, Eklemeli imalat, Radyo frekansı, Arduino

1. Giriş (Introduction)

Hızla gelişen teknolojiyle beraber robotlar hayatımızda daha fazla yer kaplamaya başlamıştır. Üretim maliyetlerinin düşmesi, işlevlerinin artması gibi etkenlerden dolayı birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadır. Sanayide ağır yüklerin kaldırılmasında, otomobil sektöründe, araç üretim bandında boyama, kaynak gibi işlerde, evler ve binaların temizliğinde, sağlık sektöründe ve büyük şirketlerin dağıtım departmanlarında robotlar aktif olarak kullanılmaktadır [1]. Bunun yanı sıra, keşif için insanların giremediği dar ve tehlikeli yerlerin araştırılması, deprem, maden göçüğü, doğal afetler sonucunda oluşabilecek enkazlarda arama kurtarma faaliyetlerin yürütülmesinde, askeri operasyonlarda kullanılmaktadır. Keşif robotları sayesinde tehlikeli alanlarda oluşabilecek can kayıpları ve yaralanmalar önlenir, arama kurtarma faaliyetlerinde canlıya daha kısa sürede ulaşılabilir. Bu sayede, can kayıplarının en aza düşürülmesini sağlar. Keşif robotları kullanılacağı alana kontrol şekline göre farklı yapısal değişikliklerle üretilebilirler [2].

Literatür incelendiğinde bu alanda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Carnegie Mellon Üniversitesi'nin Uluslararası Akıllı Robotlar ve Sistemler Konferansı'nda tanıtılan prototipte, wi-fi sinyalleriyle haberleşme sağlanmıştır [3]. Bu robotta kısa ve güçlü eklemleri sayesinde eksenlerdeki manevraların üst düzey olduğu görülmektedir. Geliştirilen prototipin eklem yapısı x ve z ekseninde hareket etmesi için kullanılan motorlar, gövde ve eklemler 3D yazıcıda üretildiği belirtilmiştir. Aynı zamanda baş kısmı (ilk modül) aydınlatma ve kamera için kullanılmıştır. Ayrıca Şahin ve Yalvaç çalışmalarında, paletli ve geniş gövdeli bir araştırma robotu gerçekleştirmişlerdir. Bilgisayarla kontrol edilip, radyo frekansı (RF) haberleşmesiyle uzaktan iletişimi sağlamaktadır [4]. Prototipin fiziksel olarak büyük yapısından dolayı sadece geniş alanlarda keşif yapması mümkündür. Prototipin büyük olması, kendi üzerine birçok sistemin yerleştirilmesine olanak sağlamıştır. Uzaktan görüntü ve ses iletebilmekte ayrıca etrafına aydınlatma sağlamaktadır. Aynı zamanda engel algılayıcı sensörler sayesinde yarı otonom olması sağlanmıştır. Diğer bir çalışmada Wright ve arkadaşları, çok fazla modülden oluşan bir tasarım önermişlerdir. Modülleri kısa oluşu robotun hareket kabiliyetini üst düzeye çıkarmış ve her eklemi iki eksen hareketinde de yer almıştır. Bu eklem yapısı sayesinde engelden atlayabilen hatta ağaçlara tırmanabilen bir tasarım geliştirilmiştir. Robot, önündeki kamera ve kısa eklemleri sayesinde rahatça önündeki hatta etrafındaki tüm görüntüyü kumanda sistemine iletmektedir [5]. Bir başka sürünge çalışmada, iki farklı prototip bulunmaktadır ve yılanların hareketlerinden esinlenen robotların tam anlamıyla bir yılan şeklinde sürünme hareketiyle ilerlediği görülmektedir [6]. Prototipler incelendiğinde ikisi de kabloyla bilgisayar üzerinden kontrol edilmekte ve büyük bir güç kaynağından beslenmektedir. Prototiplerin ilkinde, bileşenler motorların üzerinde dağınık biçimde bulunduğu ve tek eksende hareket ettiği görülmüştür. İkinci prototip ise daha düzenli ve pleksiglas şasiden oluşmaktadır.

Kuzu, çalışmada kablosuz kontrol edilebilen mobil araştırma ve müdahale robotu yapmıştır. Bu çalışma incelendiğinde paletli yapısı sayesinde arazide kolay hareketi sağlanmaktadır. Dört farklı bilgisayar üzerinden kontrol edilmekte RF ile haberleşmesi sağlanmaktadır ve Arduino mega yardımıyla kontrol edilmektedir [7]. Prototip üzerinde bulunan kamera sayesinde ortamın görüntüsü bilgisayara aktarılmaktadır. Kuzu bu çalışmasıyla arazide keşif yapabilen ve müdahale edebilen uzaktan kontrollü bir prototip geliştirmiştir. Ayrıca Sürmen çalışmada, 3D yazıcılarda üretim aşamaları, malzeme seçimi, hangi parametrelerle üretim yapılacağı açıkça anlatılmıştır. İmalattan önce parçaların tasarımı, hücre yapısının geometrisi, kullanılabilecek yazılım, dilimleme, yazıcıdaki diğer parametreler açıkça belirtilmiştir. Kullanılacak malzemelerin seçimi ve malzemelerin hangi şartlarda imal edilebildiğini ayrıntılı olarak açıklanmıştır [8].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde keşif robotları geniş gövdeli ve paletli yapıda oldukları görülmüştür. Sürünge robotlar ise yılan gibi sürünge hayvanların hareketini incelemek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sürünge hayvanların hareket kabiliyetleri örnek alınarak dar alanlarda keşif yapmaya yarayan bir robot tasarımı ve prototipi geliştirilmiştir. Tasarımı yapılan ve üretilen gövdeyle kumandanın mekanik montajı yapılmıştır. Robot gövdesinin ilk üç eklemine iki eksende kontrol edecek şekilde servo motor bağlanmıştır. Elektrik devrelerinin bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Elektriksel bağlantısı gerçekleştirilen alıcı ve verici devresi kuyruk kısmına monte edilmiştir. Sensörler kuyruk üst kapağına monte edilmiştir. Kumanda kontrol kolu, LCD ekran ve pil bağlantıları gerçekleştirilerek prototip çalışır hale getirilmiştir. Prototip çalıştırılarak kumandayla sağlıklı bir şekilde bağlantı yapılması sağlanmıştır. Prototip, servo motorlar kontrol edilerek istenilen

şekilde çalışıp çalışmadığı gözlemlenmiştir. Robotun çalışma açıları, çıktığı yükseklik, gidebileceği zeminler hakkında bilgi verilmiştir. Sensörler test edilerek sonuçları hakkında ve kamera ve alıcı çalıştırılarak görüntü iletimi hakkında bilgi verilmiştir. RF ile bağlantıların hangi mesafede çalıştığı belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material And Medhod)

Önerilen çalışma, modüler bir yapıya sahip olup her modülün farklı bir görevi var ve yapı olarak küçük olması dar alanlardan kolaylıkla geçmesini sağlamaktadır. Her modül hareketli eklemlerle bağlanmıştır bu sayede robotun hareket alanı geniştir. Eklemlerinde bulunan servo motorlar sayesinde belirli yüksekliklerden geçebilmekte veya inebilmektedir. İlk modülün önünde bulunan FPV (First Person View) kamera sayesinde hareketler anlık olarak kumanda üzerinde bulunan ekrana gönderilerek robotun kontrol edilmesi sağlanabilir [9]. Son modül üzerinde bulunan sensörler sayesinde ortamdaki nem oranı, sıcaklık ve gaz değerleri kullanıcıya iletilir. Robot üzerinde uzaktan kontrolün sağlanması için bir alıcı, sensör verilerinin ve kamera görüntüsünün iletilmesi için de iki verici bulunmaktadır [10]. Robotla kontrol kumandası arasında veri iletimi RF sinyalleriyle sağlanmaktadır [11]. Kumanda üzerinde motorların kontrolü için gerekli bir adet verici, sensörden gelen verilerin kullanıcıya iletilmesi için bir adet alıcı ve bu alınan bilgilerin kumanda üzerinde gösterilmesi için LCD ekran bulunmaktadır. Kumanda üzerinde bulunan kontrol mekanizması sayesinde robotun ileri, geri, sağ, sol, yukarı ve aşağı komutları iletilir [12]. Sensörlerden gelen anlık sıcaklık, nem ve gaz değerleri LCD ekrana yazılarak robotun bulunduğu ortam hakkında bilgi alınır. İlk modülde bulunan FPV kameradan gelen anlık görüntü kumanda üzerinde bulunan telefona aktarılır. Robotun kumanda ile RF iletişim yapabilmesi ve kullanıcının kontrol edebilmesi Arduino mikro denetleyici kartıyla sağlanmaktadır [13]. Bu mikro denetleyici bilgisayar ortamında C diliyle robota özgü olarak programlanmıştır. Yazılan bu program kumandayla haberleşmesini, kumandadan motorlara iletilen komutlara göre motorların hareket etmesini ve sensör bilgilerinin kumandaya iletilmesini sağlamaktadır. Prototipin modüler yapıda tasarlanması, geliştirmeye açık ve yapılacak eklemlerin daha kolay yapılmasına olanak sağlayacak bir tasarımı mümkün kılmıştır.

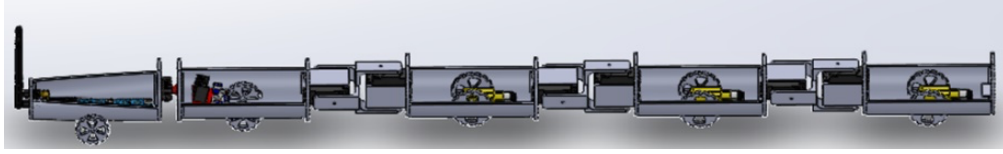
Önerilen prototipin gerçekleştirilmesi, iki ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, robot gövdesi servo ve DC motorlar, mikro denetleyiciler, sensörler (sıcaklık, nem, gaz), kamera, RF alıcı ve vericilerden oluşur. İkinci aşama ise, kumanda ekranı, kontrol kumandası, cep telefonu, RF alıcı ve vericilerden oluşur. Kullanılan malzemelerin listesi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemeler ve özellikleri (Materials used and their properties)

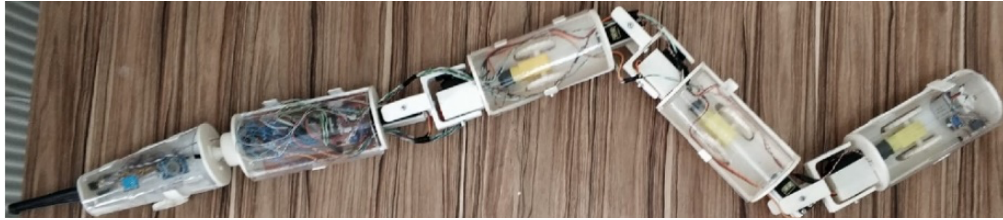
Malzeme Adı	Modeli	Adedi
Tasarlanan Robot		
Kamera	FPV	1
DC motorlar	6V 250 RPM	3
Servo motorlar	Mg995	6
Motor sürücü	L298n	1
Arduino	Nano	2
RF alıcı	NRF24L01+PA	1
RF verici	NRF24L01+PA	1
Sıcaklık sensörü	Dht11	1
Gaz sensörü	Mq7	1
Kumanda		
Telefon	Xiomi	1
Lcd ekran	2x16	1
Kontrol kolu(joystick)	İki eksen	4
Arduino	Nano	2
RF alıcı	NRF24L01+PA	1
RF verici	NRF24L01+PA	1
Kamera verici	SKYDROİD	1
Pil	Lipo	2

2.1. Prototip gövde tasarımı ve imalatı (Prototype Design and Manufacturing)

Gövde içerisinde bulunacak kamera, DC motor ve Arduino ölçülerine uygun olarak bilgisayarda tasarımı yapılarak simülasyonu SolidWorks® ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarımı biten robot gövdesi parçaları 3D yazıcı Creality® Ender3 V2 sayesinde imalatı gerçekleştirilmiştir. Parçalar bağlayıcı elemanlar yardımı ile birbirine montajı gerçekleştirilmiştir.



(a)

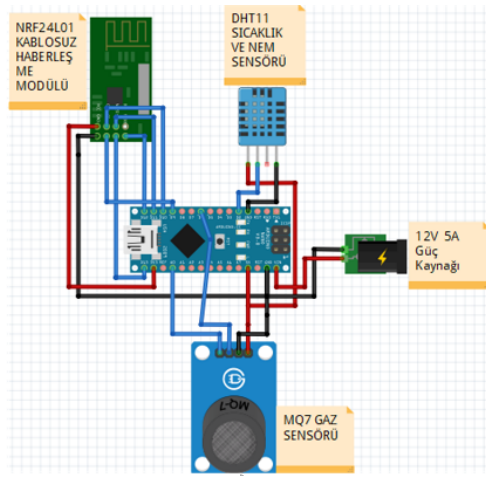


(b)

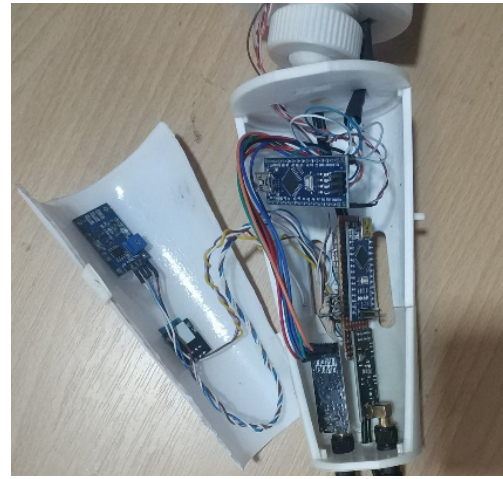
Şekil 1. a) Robot üç boyutlu tasarımı, (b) Robot üst görünümü ((a)Robot three-dimensional design, (b) Robot top view)

Şekil 1’de önerilen prototipin üç boyutlu tasarımı ve üst görünümü verilmiştir. Robot 20 cm’ye kadar kolaylıkla tırmanabilmektedir. Robot zeminden 2,5 cm yüksekte bulunmaktadır. DC motoru modülün iç zeminine yerleştirmek için uygun bir motor yuvası tasarlanmıştır. Gövdenin arka ve önüne eklenen kapaklar sayesinde robot zemine paralel bir şekilde hareket edebilmektedir.

Şekil 2’de sensörlerin verici devresinde kullanılan Arduino Nano ve NRF24L01+PA kodlu anten, Dht11 modeli sıcaklık ve nem sensörü ile Mq7 modelli gaz sensörü, verici devre tasarımına göre bağlanmıştır. Şekil 2b’de görüldüğü gibi prototip gövdesine yerleştirilmiştir.



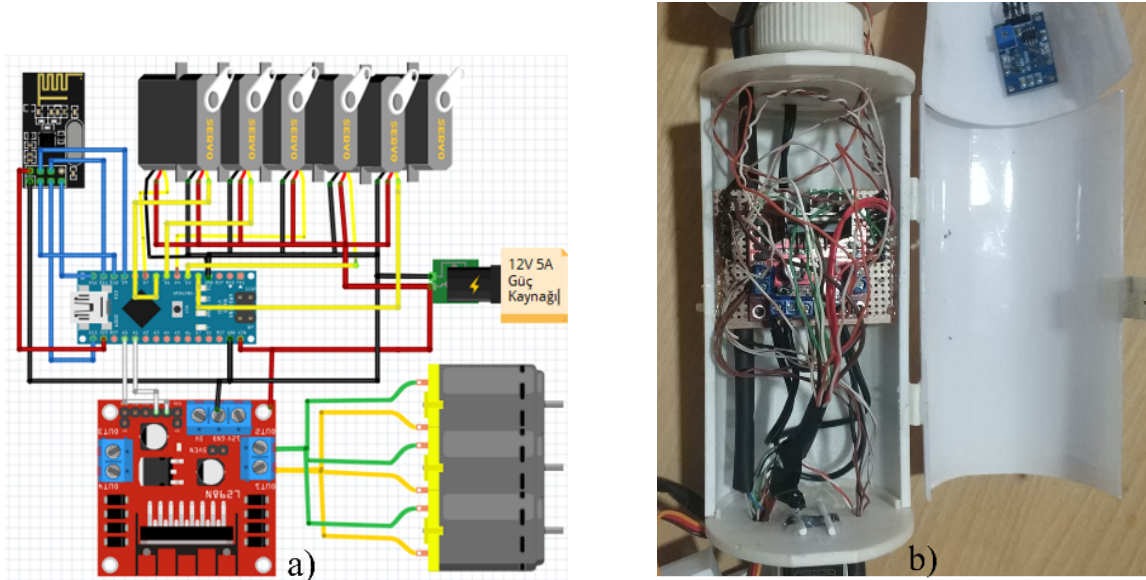
(a)



(b)

Şekil 2. (a) Sensör verici devresi tasarımı (b) Sensör verici devresi ((a)Sensor transmitter circuit design, (b) Sensor transmitter circuit)

Şekil 3’de Arduino, NRF24L01, DC motor sürücü, DC ve servo motorlar bağlantı tasarımı verilmiştir. Modüller üzerinde bulunan servo motorlar, DC motorlar, alıcı ve verici devresinin bağlantı kabloları gövde üzerindeki boşluklardan geçirilerek plakete lehimlenmiştir. Enerji beslemesi için kullanılan 12 volt DC güç kaynağı bir kablo yardımı ile delikli plaket üzerine lehimlenen pinlere bağlanarak sisteme güç verilmiştir. Motor sürücü bu plaket üzerine yerleştirilip gövdeye sabitlenmiştir.

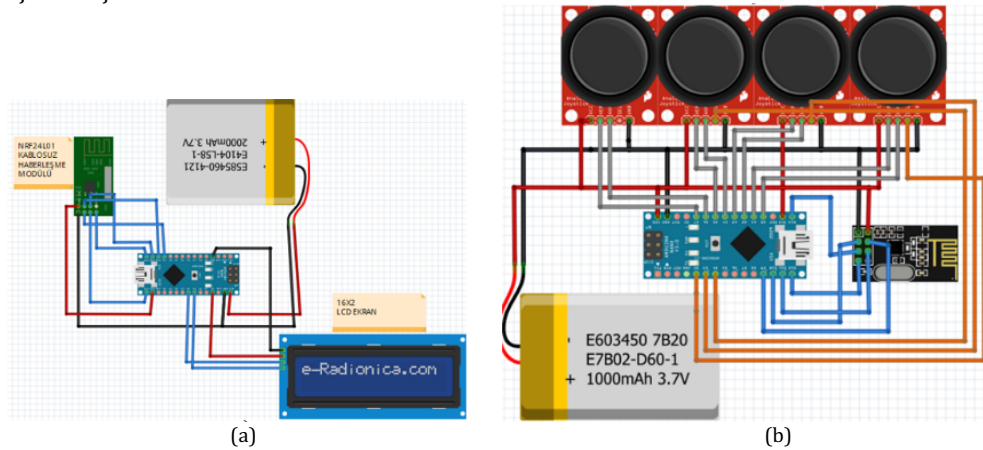


Şekil 3. (a) Kontrol alıcı devresi tasarımı (b) Robot güç bağlantısı ((a) Control receiver circuit design, (b) Robot power connection)

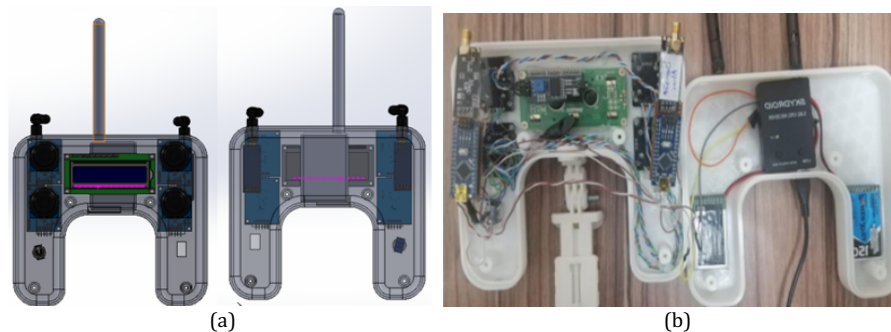
2.2. Kumanda tasarımı ve imalatı (Control Design and Manufacturing)

Şekil 4'de verilen sensör alıcı devresi, Arduino Nano, NRF24L01+PA, LCD ekran, pil ve kablo bağlantılarından oluşmaktadır. Kontrol verici devresi ise Arduino Nano, NRF24L01+PA, kontrol kolları ve lipo pilden oluşmaktadır. Ayrıca kablo bağlantıları tasarımda gösterilmiştir.

Şekil 5'deki kumandanın alt, üst ve telefon tutucusu üç boyutlu tasarımı ve montajı bulunmaktadır. Alt ve üst kapak birbirine sıkı geçme bağlantısıyla birleştirilmiştir. Ayrıca birbirine daha sağlam bir şekilde geçmesi ve sökülebilir olması için dört adet vida deliklerinden birbirlerine sabitlenmiştir. Üst kapağa telefonu sabitlemek için bir telefon tutucu yerleştirilmiştir. Tasarıma göre elektrik bağlantıları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. (a) Sensör alıcı devresi tasarımı (b) Kontrol verici devresi tasarımı ((a) Sensor receiver circuit design, (b) Control transmitter circuit design)



Şekil 5. a) Kumanda üç boyutlu tasarımı (b) Kumanda elektrik devresi montajı ((a) Control three-dimensional design, (b) control circuit assembly)

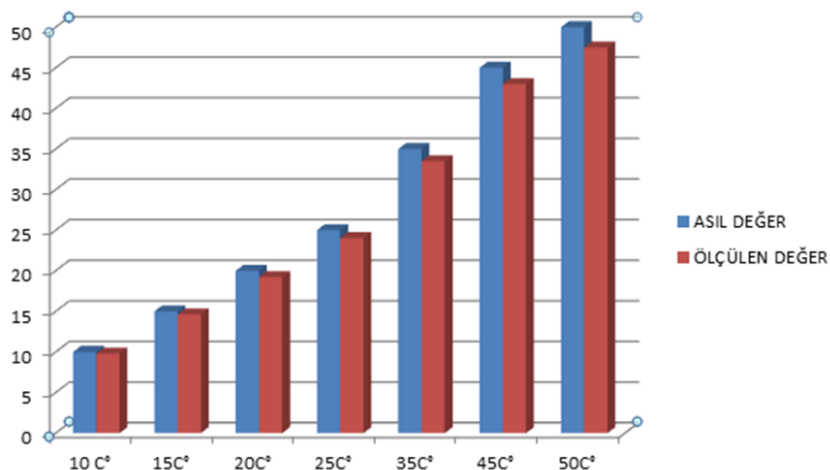
3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Kumanda, robot, katı model tasarımı ve gövde montajı Solidworks® ortamında, elektronik bağlantıları ise Fritzing® programında tamamlanarak son kontrolleri yapılmıştır. Kumanda üzerinde bulunan kontrol verici devresi ve robot üzerinde bulunan kontrol alıcı devresi Arduino içerisinde bulunan Arduino IDE ile yazılan kodlarla RF bağlantısı sağlanmıştır. Bu bağlantıyla kapalı alanda 20 metreye kadar, açık alanda ise 80 metreye kadar haberleşme yapılabilir. Kumanda üzerinde bulunan kontrol kolları ile robot eklemelerinde bulunan servo motorların kontrolü test edilmiştir. Servo motorlar kumandadan gelen hareket komutuna sivrulmaması için 1,5 saniyede tepki vermektedir. Motorların yaptığı her bir derecelik açı arasındaki süre farkı 0,05 saniyedir. Eklemler birbirlerine temas etmemeleri için motorlar sıfır konumundan itibaren sağa, sola, yukarı ve aşağı yönlerdeki yaptığı açı 70°'dir. Modüller arasında dört hareketli eklem bulunmaktadır. Birinci eklemdaki motorların hareketi üzerindeki yük ile istenilen şekilde gerçekleştirebilmektedir. İkinci eklemdaki servo motorlar sağa sola dönüşü istenilen şekilde gerçekleştirilebilir. Birinci eklemdaki motorların hareketiyle bu eksiklik giderilebilmektedir. Üçüncü eklemdaki motorlar sağa ve sola dönüş hareketini gerçekleştirebilirken; yukarı-aşağı hareketini ağırlıktan dolayı istenilen şekilde gerçekleştirememektedir. Birinci ve ikinci modüllerin konumuna göre yukarı aşağı hareketinde istenilen şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Robot 20 cm yüksekliğindeki engele çıkabilmekte ve 20 cm yüksekliklerden inebilmektedir. Robot gövdesinde bulunan DC motorlar kumandadan gelen ileri ve geri bildirimiyle istenilen şekilde hareket edebilmektedir. Kumanda üzerinden gelen komut 1,5 saniye gecikmeli olarak motorlara iletilmektedir. Bu yüzden hassas bir hız kontrolü yapılamamaktadır. DC motorların devirleri yüksek olduğundan robot hızlı bir şekilde ileri geri hareketi yapmaktadır. Robot düz zeminde istenilen şekilde ilerleyebilmektedir. Pürüzlü ve engebeli alanlarda tekerlek boyundan dolayı hedeflenen hıza ulaşamamaktadır.

Kumanda sensör alıcı, robot sensör verici, elektrik bağlantısı, gövde montajı Fritzing® programında tamamlanarak düzgün çalıştığı kontrol edilmiştir. Sensör alıcı ve verici devresi Arduino Nano içerisinde bulunan kodlar ile RF bağlantısı yapması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Robot kuyruk modülü üst kapağına montajı yapılan Dht11 nem ve sıcaklık sensörüyle Mq7 gaz sensörü Arduino yardımıyla bilgisayara bağlanarak seri port ekranından okunan değerler gözlemlenmiştir. Sensörlere, sıcaklık ve gaz uygulanarak ölçümlerin doğru bir şekilde yapıldığı test edilmiştir. Bu veriler kumanda üzerindeki alıcıya iletilmiştir. Alıcı üzerindeki LCD ekrandan sensör verileri başarılı bir şekilde okunmuştur. Robot üzerinden gelen sensör değerlerinin LCD ekrana 5 saniye gecikmeli olarak geldiği tespit edilmiştir. Robot üzerinde bulunan gaz sensörüne gaz uygulandığında gaz değeri 200 ppm'i geçtiğinde LCD ekran üzerinde "Yüksek gaz değeri" olarak uyarı vermektedir ve gaz değeri normale geldiğinde bu uyarı silinmiştir. Sensörlerin çalışma aralıkları Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 6'da Dht11 sensörünün gerçek ve ölçülen sıcaklık değerleri verilmiştir.

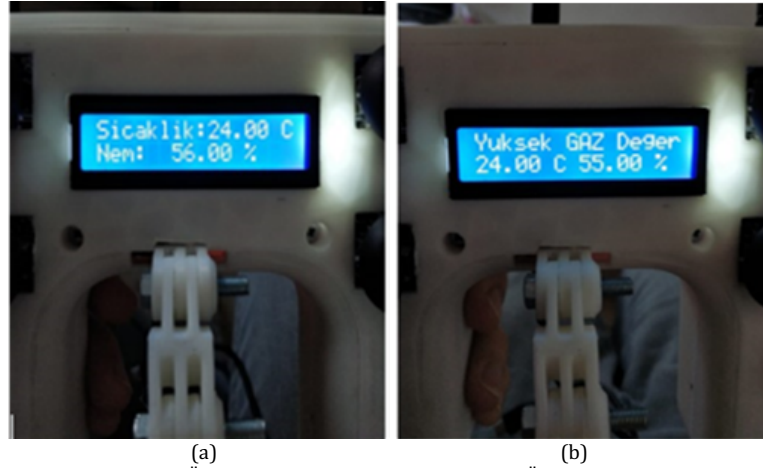
Tablo 2. Kullanılan sensörlerin minimum ve maksimum ölçüm aralığı
(The minimum and maximum measuring range of the sensors used)

Sensör Adı	Minimum	Maksimum
Dht11	-40 °C	125 °C
Mq7	10 ppm	10.000 ppm



Şekil 6. Dht11 sensörünün gerçek ve ölçülen sıcaklık değerleri (Actual and measured temperature values of Dht11 sensor)

FPV kamera üzerinde bulunan verici, kumanda üzerinde bulunan kamera alıcısıyla sağlıklı bir bağlantı sağlamıştır. Kameradan gelen görüntüler kumanda üzerinde bulunan telefona iletilmiştir. Kameradan gelen görüntü kapalı alanda 25 metreye kadar, açık alanda ise 100 metreye kadar iletilmektedir. Kamera beslemesi ana sistemden bağımsız olarak 3,4 volt lipo pille sağlanmaktadır. Karanlık ortamlarda kameranın görüntü olması modül önünde bulunan ledlerle sağlanmaktadır. Bu ledler sayesinde karanlıkta 3 metreye kadar görüş mesafesi sağlanabilmektedir.



Şekil 7. (a) Ölçülen sıcaklık ve nem değerleri (b) Ölçülen gaz değeri
((a) Measured temperature and humidity values, (b) Measured gas value)



Şekil 8. Kumanda kamera görüntüsü (Remote camera view)

4. Sonuç (Result)

Ülkemizde deprem gibi doğal afetler kaçınılmaz bir gerçektir. Her gün gelişmekte olan teknolojiyle arama kurtarma ve keşif robotları sayesinde göçük altında kalan canlıların yerini tespit etmek ve kurtarmak daha kolay hale gelmektedir. Bu çalışmada, dört eklemlili RF kontrollü bir sürünge keşif robot prototipi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Robotun istenilen hareketleri ve veri alış-verişinin sağlanması Arduino yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu robotun kontrolü için robota özgü bir kumanda tasarlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda önerilen prototip geliştirilerek, deprem sonrası enkaz çalışmalarında kullanılması hedeflenmektedir. Bununla birlikte önerilen bu prototip, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak PLA malzemeden 3D yazıcıyla üretildiği için enkaz altındaki zor koşullara dayanıklı değildir. Fakat tasarım açık ve engebeli arazide test edilmiştir ve farklı tür zeminlerde manevra ve ilerleme kabiliyetinde herhangi bir olumsuzlukla karşılaşmamıştır. Aynı zamanda prototip ve kumanda bulunan alıcı-vericilerin haberleşmesi, kapalı alanlarda bulunan engeller için de test edilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, 1919B012003402 nolu 2209-A projesi altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca, TÜBİTAK-2242 üniversite öğrencileri araştırma proje yarışmalarında "Sosyal Yenilikçilik ve Girişimcilik" kategorisinde ikincilik ödülünü kazanmıştır. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] G. Gürgüze ve İ. Türkoğlu, "Robot sistemlerinde kullanılan algoritmalar," *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, cilt 8, sayı 1, ss. 17-31, Haziran 2019. Doi:
- [2] A. Çakır, L. Karaca ve M. Özkul, "RF kontrollü araştırma ve inceleme robotu," *Anka E-Dergi*, cilt 2, sayı 1, ss. 13-25, Kasım 2017. Doi:
- [3] D. Rollinson, Y. Bilgen, B. Brown, F. Enner, S. Ford, C. Layton, and H. Choset, "Design and architecture of a series elastic snake robot," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2014, Chicago, Illinois, September 14-18, 2014 USA*, pp. 4630-4636.
- [4] İ. Şahin ve M. Yalvaç, "Myrobot: Kablosuz kontrol edilebilen mobil araştırma robotu," *Education Sciences*, cilt 7, sayı 1, ss. 340-347, Şubat 2012. Doi:
- [5] C. Wright, A. Buchan, B. Brown, J. Geist, M. Schwerin, D. Rollinson, and H. Choset, "Design and architecture of the unified modular snake robot," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2012, St. Paul, Minnesota, USA, May 14-18, 2012*, pp. 4347-4354.
- [6] A. Kılıçarslan, "Yılan tipi hareket mekanizması ve hareket kontrolü," M.Sc. Thesis, İstanbul Technical Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [7] E. Kuzu, "Kablosuz kontrol edilebilen mobil keşif ve müdahale robotu," M.Sc. Thesis, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2016.
- [8] H. K. Sürmen, "Eklemli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar," *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, cilt 24, sayı 2, ss. 373-392, Ağustos 2019, doi:10.17482/uumfd.519147
- [9] E. T. Efaz, M. M. Mowlee, J. Jabin, I. Khan, and M. R. Islam, "Modeling of a high-speed and cost-effective FPV quadcopter for surveillance," in *The 23rd International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2020, Dhaka, Bangladesh, December 19-21, 2020*, pp. 1-6.
- [10] A. Raj and V. Venkatesh, "Implementation of wireless sensor network with low cost and low power using Arduino and nRF24L01," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 119, no. 18, pp. 2095-2103, June 2018.
- [11] "6 Kanallı Uzaktan Kumanda Nasıl Yapılır," rcpano.net, Sept. 04, 2020 [Online]. Available: <https://www.rcpano.net/2020/04/09/6-kanalli-uzaktan-kumanda-nasil-yapilir-diy-rc/>. [Accessed: Oct. 05, 2021].
- [12] T. Soytepe, "Arduino ile nrf24l01 Kullanarak Kontrol Kolu ile Servo Kontrolü," donanimplus.com, Apr. 15, 2019. [Online]. Available: <https://donanimplus.com/arduino-ile-nrf24l01-kullanarak-joystick-ile-servo-kontrolu/>. [Accessed: Oct. 10, 2021].
- [13] A. C. Gheorghe and C. I. Stoica "Wireless weather station using arduino mega and arduino nano" *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, vol. 21, no.1, pp. 35-38, May 2021, doi:10.2478/sbeef-2021-0008

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Machining Conditions on Surface Roughness and Burr Formation in Milling of AISI 304 Cast Stainless Steel

Mehmet Boy^{a,*}, Mürsel Avcı^b

Submitted: 27.10.2021 Revised: 03.12.2021 Accepted: 22.01.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.06

ABSTRACT

Keywords: AISI 304 stainless steel, Face milling, Burr height, Surface roughness, Mist cold air cooling

^{a,*} Karabük University,
TOBB Vocational High School,
Dept. of Machine and Material
Technologies
78100 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2471-8001

^b Karabük University,
The Institute of Graduate Studies
Dept. of Manufacturing Engineering
78100 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1808-0438

*Corresponding author:
mboy@karabuk.edu.tr

AISI 304 quality stainless steels are a very common type of stainless steel because they have high mechanical properties and high corrosion resistance. Stainless parts with complex and large dimensions are produced by the casting method. The machinability of stainless steels produced by casting is even more difficult than forging methods. In this study, the effects of three different cutting speeds, feed rates and constant cutting depth on the surface roughness and burr formation in dry and mist cold air (MCA) conditions were investigated in milling of AISI 304 stainless cast steel. As a result, an improvement between 15% and 48% was achieved in the average surface roughness (Ra) obtained in machining with MCA compared to dry machining conditions. In both cutting conditions, the increasing feed rate increased the burr height, while the increase in cutting speed decreased the burr height. MCA application provided an average of 9% reduction in burr height

AISI 304 Paslanmaz Döküm Çeliğinin Frezelemesinde İşleme Şartlarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Çapak Oluşumuna Etkisi

ÖZ

AISI 304 kalite paslanmaz çelikler yüksek mekanik özelliklere ve yüksek korozyon direncine sahip olduklarından oldukça yaygın kullanılan bir paslanmaz çelik çeşididir. Karmaşık ve büyük ebatlara sahip paslanmaz parçalar döküm yöntemi ile üretilmektedir. Döküm ile üretilen paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği dövme yöntemlerine göre daha da zor olmaktadır. Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz döküm çeliğinin frezelenmesinde kuru ve buharlı soğuk hava şartlarında üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme miktarı ve sabit kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak buharlı soğuk hava (BSH) ile işlemede elde edilen yüzey pürüzlülüklerinde kuru işleme şartlarına göre %15-%48 arasında bir iyileşme sağlanmıştır. Her iki kesme şartında, ilerleme miktarı çapak yüksekliğini artırırken kesme hızının artışı çapak yüksekliğini azaltmıştır. BSH uygulaması çapak yüksekliğinin ortalama %9 azalmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 304 paslanmaz çelik, Yüzey frezeleme, Çapak yüksekliği, Yüzey pürüzlülüğü, Buharlı soğuk hava soğutma

1. Introduction

Austenitic stainless steels are characterized as the richest stainless-steel group due to their use and the high alloy qualities they have. Austenitic stainless steels are non-magnetic, normalizing and hardening cannot be done to these steels at room and high temperatures as they retain their austenitic internal structure bearing a face-centered cubic lattice. Ductility, toughness, and formability are very good at low-temperature values in the annealed state. Their strength can only be increased by cold forming. Austenitic stainless steels contain 16%-26% Cr, up to 35% Ni and up to 20% Mn alloy elements. Ni and Mn undertake the basic austenite formation. Among the austenitic stainless-steel grades, AISI 301 and AISI 304 are the steel types that contain the least alloying elements. AISI 304 quality stainless steel is the most widely used type of stainless steel with its excellent machinability, good ductility and corrosion resistance [1-2].

Milling is a well-known machining technique in the metalworking industry. The surface quality of components determines their quality. Excessive heat, tool wear, and poor surface quality can all be caused by high friction between tool contacts. The use of cooling lubricants in machining is critical for improving machining performance. However, the usage of cooling lubricants is expensive, pollutes the environment, and endangers operator health [3-4]. Surface roughness is the most important indicator of machined item surface quality and one of the most stringent client requirements. Noordin and his team It has been established that the feed rate influences surface roughness, and that using a lower feed rate leads in greater surface quality. It was also revealed that when cutting speed increased, the resulting surface roughness value increases [5]. Austenitic stainless steels' enhanced ductility explains higher surface roughness values at higher cutting speeds. This increases the possibility of separate and unstable markers emerging (BUEs). Surface quality suffers due to the presence of large and unstable BUE [6]. There is much research in the literature on reducing tool wear and BUE formation, improving surface roughness, and using alternative cooling and lubrication methods instead of cooling lubricants when machining stainless steel materials [7].

Rahman et al. [8] found that high-pressure cooling reduces cutting resistance and improves surface quality on milling machines. Liew provided better surface quality with fog cooling than traditional cooling methods when milling AISI 420 alloy using coated and uncoated carbide end mills [9]. Braham Bouchnaketal investigated tool wear when machining duplex stainless steel by cooling with high-pressure water. Compared to dry cutting, a better surface is achieved when processed by cooling with pressurized water. Pressure cooling extended the service life by 20% [10]. Chockalingam and Wee studied the effects of synthetic oils, aqueous emulsions and compressed cold air on cutting resistance, surface roughness and tool wear when milling stainless steel AISI 304. Aqueous emulsion processing has achieved better surface quality and lower cutting power. While traditional cooling lubricants require a high feed rate to reduce surface roughness, a low feed rate is suitable for cold compressed air [11]. Şirin and Şirin investigated the effects of cooling conditions (MQL, LN2 and MQL+LN2) on surface roughness, cutting temperature and flank wear in milling AISI 316L stainless steel. Milling with the MQL+LN2 cooling method significantly improved machining output compared to other cooling conditions [12].

Yıldırım investigated the effects of nano-graphite reinforced cutting fluid, oil flow, and pressure on Ra and temperature on cutting zone in AISI 316 steel milling at different rates, and nanofluid gave better results for eco-friendly machining [13]. Kuram investigated the effect of different coated cutting tool performance on tool wear, cutting pressures, and surface roughness while milling AISI 304 stainless steel material and AlTiN coated inserts showed the worst performance [14]. Altinkaya and Güllü achieved the best cutting tool performance with TiAlN coated tools in AISI 316 stainless steel machining with insert end mills [15]. Çakıroğlu and Uzun stated that in high feed milling of vermicular graphite cast iron, the resultant force decreases as the hardness of the material decreases, and the surface roughness worsens as the feed rate increases [16].

In milling operations, burrs may occur at the entrance and exit of the cutting tool to the workpiece. Generally, burr formation is defined as plastically deformed materials formed at the corners and edges of the part due to plastic flow from cutting operations. These unwanted materials can often occur in different shapes and forms, depending on the machining process and workpiece materials [17, 18]. Burr formation causes secondary machining operations known as deburring operations, increasing the cost of machining parts. In addition, while causing dimensional errors, it can negatively affect the

quality of the part, while it can cause safety problems that can lead to injuries to workers during processing [17,19]. Therefore, it is necessary to control and minimize the formation of burrs to reduce the dependence on the deburring process. For this purpose, studies are carried out to reduce burr formation in the milling of various steel materials. Lin [20] has shown that there can be five types of burrs on the edges of the workpiece, depending on the cutting conditions when face milling one end of stainless steel. Silva et al. [21] analyzed the effect on the burr height at the side edge of the piece in machining of PH13 8 Mo stainless steel. They found that the height of the burrs was greatly affected by the shape of the cutting tool and the radial cutting depth, but not by the method of applying coolant. Saha and Das [22] conducted a front milling machine test with an additional bevel at the trailing edge of the workpiece to minimize the formation of burrs on the steel block during drying. They observed the slightest trailing edge with a trailing edge tilt angle of 15 °. Heisel et al. [23] found that lubrication reduced the amount of burrs and that cutting speeds at constant feed rates did not significantly affect burr formation. They also reported that the height of the burrs decreased as the angular radius of the tool increased.

The literature focuses on cutting resistance, surface roughness and cutting parameters on tool wear, cutting tool quality, and the effects of cutting fluids when machining a variety of stainless steels. However, research on AISI 304 stainless steel milling machines is limited, and this study investigated the effects of dry cutting conditions. On the other hand, the high segregation, mixed crystal structure, microstructure, and oxide-containing materials of cast stainless steel make their machinability difficult. This work looked at how different cutting settings and circumstances affected surface roughness and burr development when milling stainless steel AISI 304.

2. Material and Method

2.1. Features of workpiece and milling tool

AISI 304 material with dimensions of 50x80x50 mm was used in the milling tests. The composition of the test sample is given in Table 1. XNKT 080508 PNER ML PC5300 with cemented carbide pilot insert, produced by Korloy company, is designed for milling of AISI304 cast stainless steel. The inserts have TiAlN PVD coating and M30 ISO quality. EM90 XN08 D32 C32 L150Z2 designation tool holder was used.

Table 1. Chemical composition of AISI 304 test sample, %

Cr	Ni	Mn	Si	C	V
17.383	8.478	1.182	1.065	0.062	0.069
Cu	P	S	Mo	Al	Fe
0.321	0.034	0.015	0.431	0.003	70.84

2.2 Cutting conditions and experimental setup

The tests have been executed on a Taksan TMC-500V using three cutting speeds (100, 130, and 160 m/min), three feed rates (0.1, 0.15, and 0.2 mm/mouth), and constant cutting depth of 2 mm. Machining experiments were carried out by applying dry and mist cold air. A mixture of air and 5% K102-Force semi-synthetic oil was used at 6 bar pressures in mist cooling processing.

The experimental system includes investigating the effects of machining parameters on Ra and burr formation in dry and mist cold air processing of AISI 304 stainless cast steel at different cutting parameters. The experiments were firstly carried out with the down milling method using carbide cutting tools at the cutting parameters determined under dry machining conditions. Then, the same cutting parameters were carried out using the Frigid-X Sub-ZeroVortex mist cooling system. Experiments were repeated using a new cutting tool in each experiment to ensure reliability (Figure 1).

After the milling process, the Ra measurement was made with Mahrsurf M300 roughness device from six different regions of the surfaces and the average of them was taken. Afterward, photographs of the processed test specimens were taken and the burrs formed on the edges of the machined surfaces were examined with a Nikon SMZ745T tool microscope. The burrs formed on the machined edges were magnified 0.67x under an optical microscope and the burr heights were measured using the Clamex

Captiva software (Figure 2) and the evaluations were made by taking the average of the obtained data.

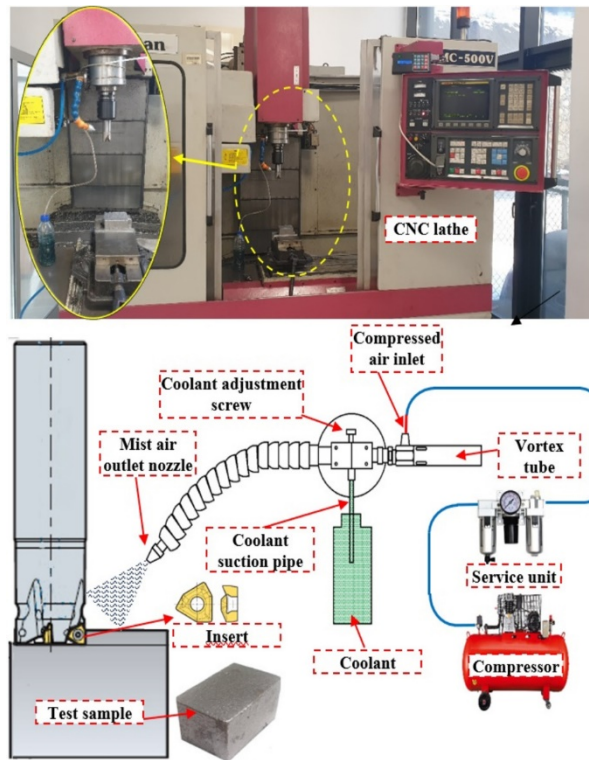


Figure 1. Experimental setup

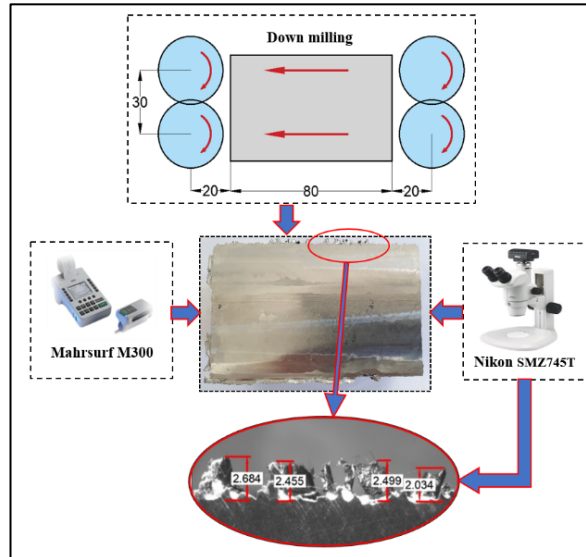


Figure 2. Measurement of Ra and burr height

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Evaluation of surface roughness

The Ra is evaluated using dry air and mist cold air (MCA) while milling stainless steel AISI 304 under various machining conditions and displays the Ra value obtained. Figures 3 and 5 demonstrate this. It is well understood that raising the feed rate raises the Ra value. Another machining metric, Ra, is projected to improve as cutting speed increases. The graphic in Figure 3 shows that the Ra value changes when the feed rate increases. The roughness value decreases at the feed of 0.15 mm/tooth as the cutting speed increases proportionally. Under dry machining circumstances, the smallest Ra was

reached with 0.15 mm/tooth feed and a cutting speed of 160 m/min, whereas the highest Ra was achieved with the same feed and a cutting speed of 100 m/min.

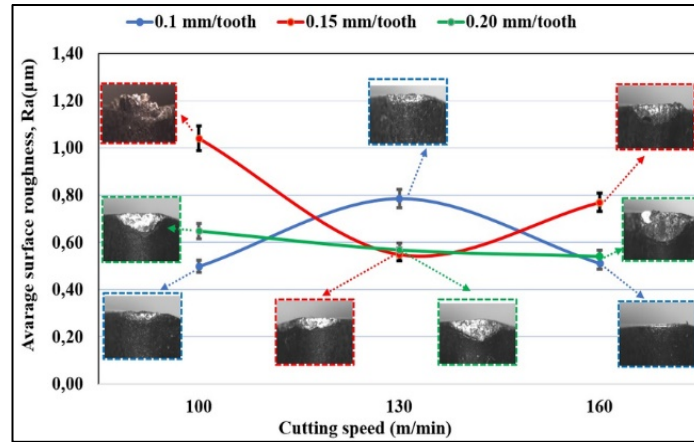


Figure 3. Variation of Ra versus cutting speed in dry milling

With a feed rate of 0.1 mm / tooth, raising the cutting speed from 100 m/min to 130 m/min improved the Ra value by about 52%, while increasing the cutting speed slightly decreased the Ra value. The irregularity of the microstructure of the material, the hardness towards the high surface of the material, and the production of irregular landmarks (BUEs) owing to the interaction of feed and shear due to the ductile nature of austenitic stainless steel might all explain this Ra tendency. The greater BUE production at lower cutting speeds utilizing the feed medium enhanced the Ra, as shown in the tool picture in Figure 3. With the feed of 0.15 mm/tooth and a cutting speed of 100 m/min, a maximum Ra of 1.04 μm was obtained. Ra values were lowered by 89% and 24% when the cutting speed was increased to 130 and 160 m/min, respectively. Increasing the cutting speed raises the temperature of the cutting zone, which reduces the likelihood of BUE [24] and allows for more stable cutting. When the cutting speed was increased from 100 to 130 m/min with a feed rate of 0.2 mm/tooth, the Ra value climbed by 14 percent, and at 160 m, the Ra value increased by 26 percent. The minimum cutting speed was observed. This increase in Ra is caused by cutting tool wear caused by the interplay of high feed rates (Figure 4).

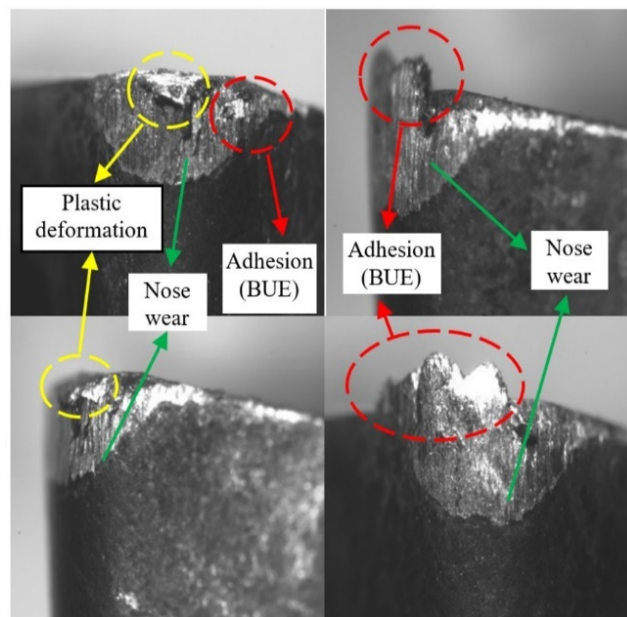


Figure 4. Tool wear images at 160 m/min cutting speed and 0.2 mm/tooth feed; a) Dry cutting, b) MCA

Figure 5 shows graphs of average Ra values acquired when milling AISI 304 stainless cast steel with mist cold air (MCA). When machining with MCA at a cutting speed of 100 m/min and a feed rate of 0.2 mm/min, the lowest Ra value is obtained, while the greatest Ra value is obtained at the same cutting

speed and 0.15 mm/tooth feed rate of this result was obtained. In the MCA condition, the Ra value fluctuates based on the interaction between cutting speed and feed, just as it does in dry cutting. At a cutting speed of 130 m/min, the Ra values measured for all feeds are visibly near each other.

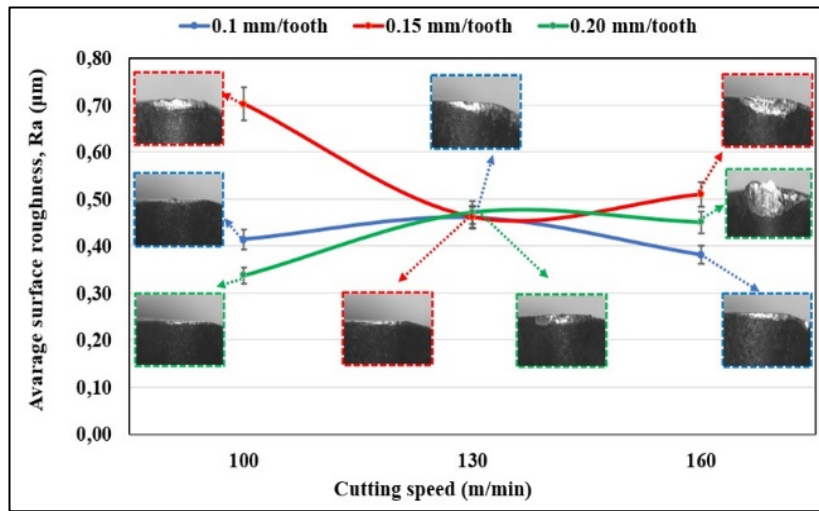


Figure 5. Variation of Ra versus cutting speed in MCA milling

Ra is 0.414 µm at 0.1mm/tooth feed and 100m/min cutting speed. When the cutting speed was increased to 130 m / min, the Ra value increased by 41% to 0.702 µm, then reduced to 0.337 µm when the cutting speed was increased to 160 m/min. This Ra trend is generated by a rise in cutting speed, resulting from an increase in cutting resistance and a decrease in chip adhesion to the cutting edge [25]. The Ra value at 0.2 mm/tooth feed is like the Ra value at 0.1 mm/tooth feed, indicating a similar trend. Surface quality degraded owing to cutting tool wear, which increased BUE when paired with high cutting and feed rates, similar to the results in a dry cutting environment. Raising the cutting speed from 100 m/min to 130 m/min at 0.15 mm/tooth feed raised the Ra value by 40, increasing the roughness value significantly at 160 m/min. This rise is thought to be caused by machine vibration [26] and tool wear, which can increase with increased cutting speed, as seen in Figure 4.

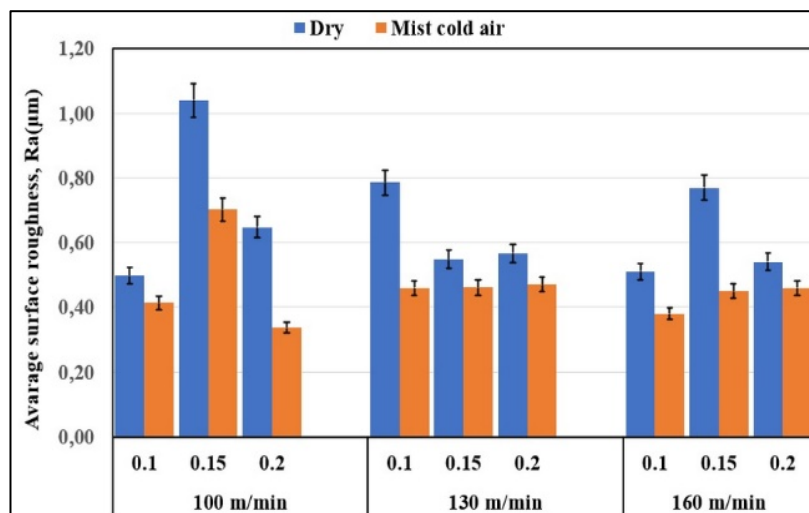


Figure 6. Comparison of the effect of cutting conditions on Ra

Figure 6 compares the Ra values obtained by milling AISI 304 alloy under dry and MCA cutting conditions. It was found that the Ra value obtained under MCA treatment conditions was lower (16% 48%) than the Ra value obtained by dry treatment. The greatest improvement was obtained at a cutting speed of 100 m/min and a tooth feed of 0.2 mm, which resulted in a 48 percent decrease. At a cutting speed of 100 m/min, an improvement of 0.1 mm/tooth feed compared to dry machining was attained, as well as an improvement of 0.15 mm / tooth feed compared to dry machining. At cutting rates of 130 m/min, reductions of 41 percent, 16 percent, and 17 percent were recorded at each feed level. Wrinkles

were found at 0.1 mm / tooth feed 26%, 0.15 mm / tooth feed 41%, and 0.2 mm / tooth feed 15% at a cutting speed of 160 m / min. The MCA application leverages its lubricating function to minimize friction at the tool tip contact, and its cooling function reduces tool wear [27], allowing for the development of shorter tip forms. Therefore, reducing the thermomechanical effect at the tool tip interface reduces the BUE formation and makes the cutting process more stable. As a result, lowering the temperature of the cutting shadow in MCA applications improves tool wear, tip coating, and surface roughness. Alternatively, it is thought that the fluctuations in the Ra are caused by the casting method of the workpiece. After the casting process, it is seen that different inclusions and reoxidation residues are formed because the casting cooling rate is low and takes place under normal environmental conditions (Figure 7). The remaining particles created by the interaction of the liquid metal with the air at any step of the casting process are referred to as reoxidation residue [28]. Reducing the quantity of residue created by minimizing the interaction of the liquid metal with the air at all stages of the casting process.

When the workpiece's EDX analysis is evaluated, residues such as Cr2O3, FeO, MnO, and MoO2 are seen. Because the structure of these residues is exceedingly rigid, they produce quick tool wear and changes in cutting forces during machining, hence worsening Ra. In addition, the hardness on the surface of the workpiece varies between 28-31 HRC, and it is thought that this hardness change triggers the fluctuations in Ra by affecting the outputs of the cutting process (chip formation, cutting force and tool wear).

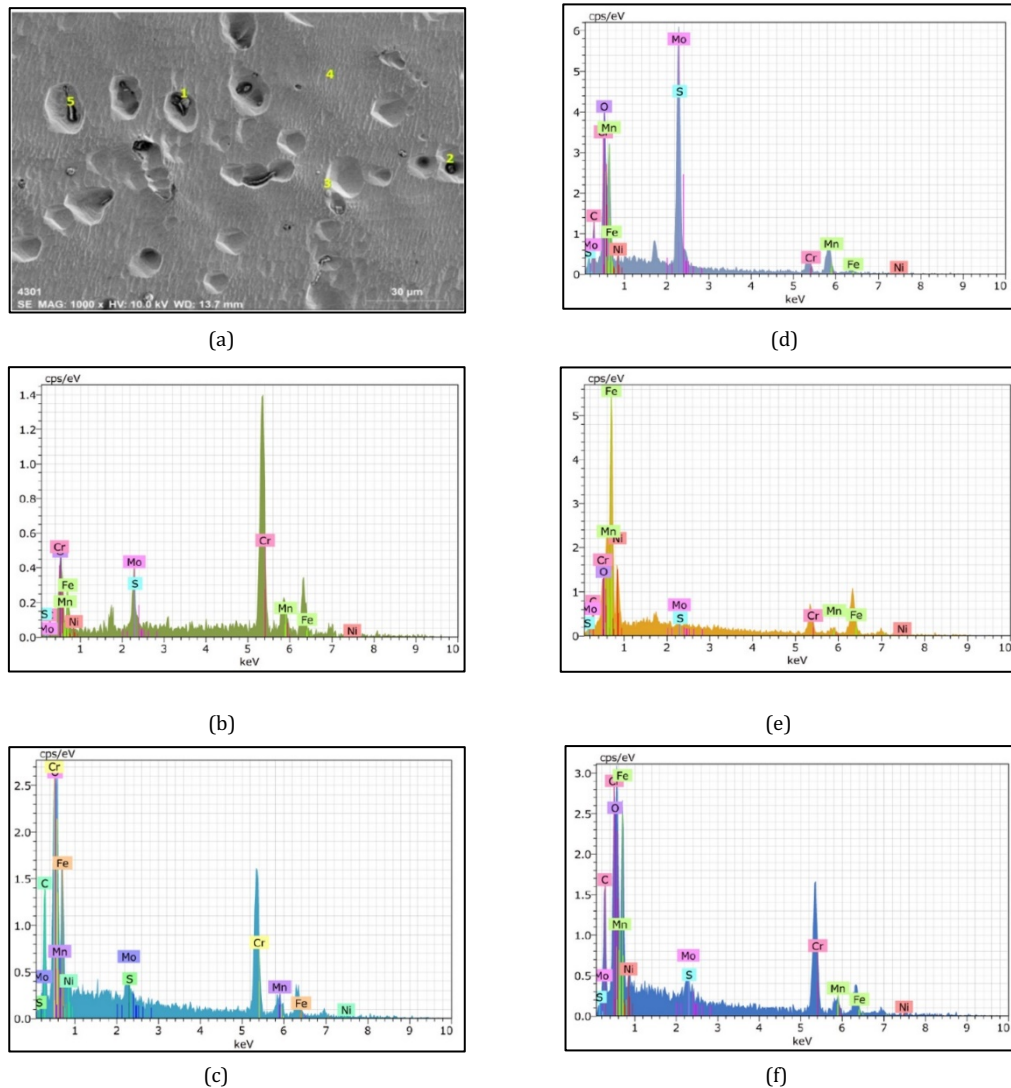


Figure 7. EDX analysis of the sample (a) Spectrum points, (b) Spectrum 1, (c) Spectrum 2, (d) Spectrum 3, (e) Spectrum 4, (f) spectrum 5

3.2. Evaluation of Burr Formation

Cutting speed, feed rate, cutting depth, workpiece shape, and cutting tool are all variables that influence burr growth on the front mill, and these qualities affect burr size and morphology. This study evaluated the types and heights of burrs formed under various cutting conditions. The height of the burrs and the thickness of the burr roots are used to calculate the size of the burrs.

Figure 8 depicts the burr types created during milling of AISI 304 alloy under different cutting conditions and machining environments. Burrs were generated on the edges of the workpiece after milling at the entry and exit of the cutting tool to the workpiece. When the types of burrs formed on the workpiece were examined, it was observed that knife type, saw, wave and burr-breakage burr types were formed and these burr types were similar to the burr types obtained in previous studies [20].

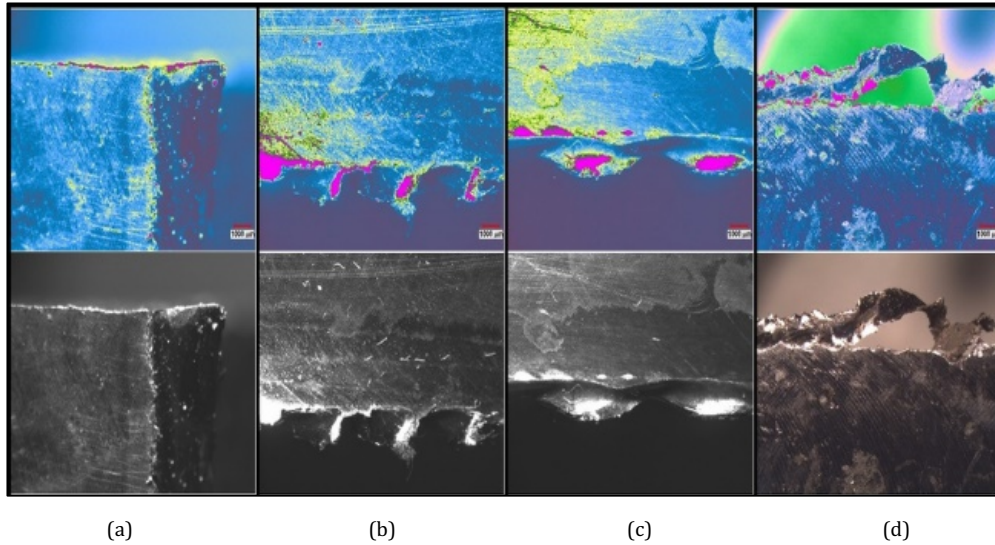
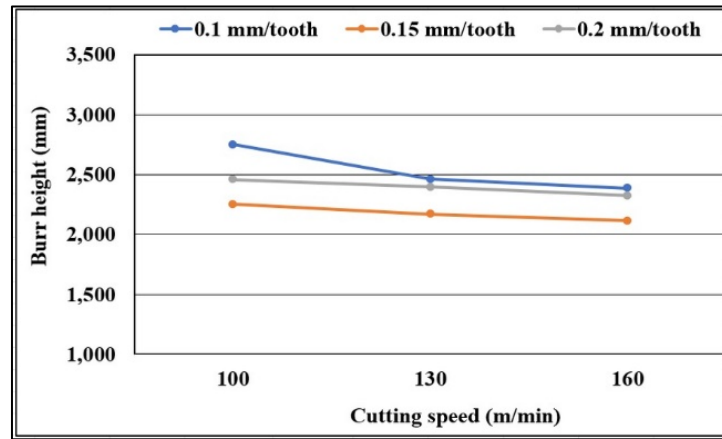


Figure 8. Types of burrs (a) Knife type (b) Saw type (c) Wave type (d) Burr breakage

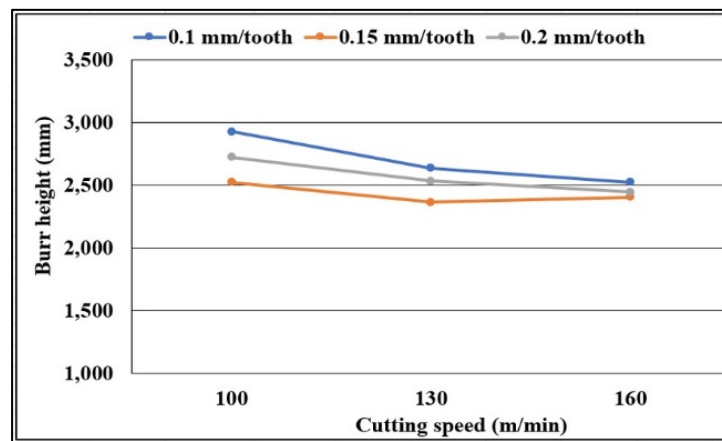
It has been observed that knife-type burrs are generally formed at the entrance of the cutting tool to the workpiece in dry and MCA machining. This type of burr is formed by pushing out the uncut workpiece material when no chips are formed in the cutting tool. Saw-type burrs are similar to knife-type burrs, but they are a type of burr that occurs due to a small amount of breakage of the cutting tool edge. This sort of burr was most common in dry machining at high cutting speeds (160 m/min). The wavy burr is created by force applied to the material during the burr formation process. As a result, the top burr length is greater than the actual length of the machined edge, forcing the burr to take on a wavy form. In general, wavy type burr development was found at a feed rate of 0.1 mm/tooth in the studies. Burr breakage happens when a break in the center of the burr occurs, resulting in burr separation. Burr breaking usually happens after the second pass cutting process, independent of feed rate. In the dry machining condition, the ductility of the material increases as the temperature rises, usually in the low feed-high cutting speed interaction, which causes burr breakage at the edge of the workpiece.

The graphs depict the changes in burr heights caused by milling AISI 304 stainless cast steel as a function of feed rate, cutting speed, and machining parameters (Figure 9). Figure 9a depicts the effect of cutting speed and feed rate on burr height in dry machining, whereas Figure 9b depicts the effect in mist cold air (MCA) machining. The burr height created at 0.1 mm/tooth feed is greater than the other feed rates in the dry machining condition. Especially in the processing of ductile materials, because the chip volume removed at a low feed rate is less, chips with thinner sections are formed [28] and cause an increase in burr height. However, it is seen that the burr heights are higher at 0.2 mm/tooth feed rate than 0.15 mm/tooth feed. During milling, the feed per tooth defines the height of uncut chips [29], so as the feed increases, the thickness of uncut chips rises and the height of burrs rises as well. Under dry machining conditions, minimum burr heights were achieved with cutting speeds of 0.1 mm / min and 100 m / min, and maximum burr heights were achieved with 160 m / min and 0.15 mm / tooth feed. Looking at Figure 8b, the height of the burrs formed during MCA processing is similar to the height of burrs formed during dry processing. When machined with MCA, the most significant burr height is

attained with a cutting speed of 100 m / min and a feed of 0.1 mm /tooth, and the lowest burr height is achieved with a cutting speed of 160 m / min and a feed of 0.15 mm / tooth.



(a)



(b)

Figure 9. Burr heights (a) Dry milling (b) MCA milling

When we examine the effect of cutting speed on burr height, we can observe that as the cutting speed rises, the burr height lowers. As the cutting speed increases, the friction at the cutting tool contact decreases, allowing plastic deformation and reducing chip thickness. As a result of the thermomechanical interaction in the second deformation zone, the plastic stress during chip formation is reduced [29]. This decrease affects the shape and size of the ridges that develop. High cutting temperatures at high cutting speeds, on the other hand, enhance tool wear and ductility, which has a negative impact on burr development. As is clear from Fig. 9, raising the cutting speed to 160 m/min reduced the tendency of the burr height to decrease.

When the burr heights obtained in dry and MCA cutting conditions are compared, it can be seen that lower burr heights occur in machining with MCA (Figure 9). A 5-10% drop was seen at 100 m/min cutting speed, 5-8% at 130 m/min cutting speed, and 5-12% at 160 m/min cutting speed. The high cutting temperature that happens at fast cutting speeds affects the material's flexibility and the creation of burrs [19]. MCA treatment had a good influence on burr development by lowering the cutting temperature. The applied cooling/lubrication method provided an average of 9% reduction in burr height. This result shows that the deburring operations after machining will be minimized with the cheap and easy-to-apply MCA method.

4. Conclusions

In the milling of AISI 304 steel, the interactions of numerous machining settings with surface roughness and burr height were investigated, and the results are presented below.

- Hard impurities in AISI 304 stainless casting steel structure caused rapid tool wear and aggravated Ra.
- When compared to dry machining, Ra improved by 15% to 48% during the face milling process with MCA application.
- In milling AISI 304 stainless cast steel, different burr forms such as blade, wavy, saw and burr breakage were formed on the workpiece.
- In dry and MCA cutting conditions, the burr height grew as the feed rate increased, whereas the burr height reduced as the cutting speed increased.
- In processing AISI 304 and similar materials, the mist cold air method is recommended for industrial applications in terms of good surface quality and minimum burr formation.
- The effects of machining conditions on the corrosion resistance on machining of AISI 304 stainless steel can be investigated in future studies.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] J. Kopac and S. Sali, "Tool wear monitoring during the turning process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.113, pp. 312–316, June 2001. doi:10.1016/S0924-0136(01)00621-5
- [2] M. Günay, "AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 28, sayı 3, ss. 437-444, 2013.
- [3] N. S. K. Ross, G. Manimaran, S. Anwar, M. A. Rahman, M. E. Korkmaz, M.K. Gupta, A. Alfaify, M. Mia, "Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication" *Tribology International*, vol. 155, pp. 106762, 2021. doi:10.1016/j.triboint.2020.106762.
- [4] P.S Sreejith and B.K.A Ngoi, "Dry machining: Machining of the future" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 101, no 1–3, pp. 287-29, 2000. doi:10.1016/S0924-0136(00)00445-3.
- [5] M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh, C.L. Chan and A. Abdullah, "Performance evaluation of cemented carbide tools in turning AISI 1010 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 116, no 1, pp.16-21, 2001. doi:10.1016/S0924-0136(01)00838-X.
- [6] D. O'Sullivan and M. Cotterell, "Machinability of austenitic stainless steel SS303," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 124, no 1-2, pp. 153-159, 2002. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8.
- [7] M. Danish, M. K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, M. E. Korkmaz, "Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718," *Tribology International*, vol. 163, pp. 107178, 2021. doi:10.1016/j.triboint.2021.107178.
- [8] M. Rahman, A. Senthil Kumar, and M.U. Salam, "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42 no 5, pp. 539-547, 2002. doi:10.1016/S0890-6955(01)00160-2.
- [9] W.Y.H. Liew, "Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions," *Wear*, vol. 269, pp. 617-631, 2010. doi:10.1016/j.wear.2010.06.012.
- [10] T. Braham-Bouchnak, G. Germain, P. Robert, and J.L. Lebrun, "High pressure water jet assisted machining of duplex steel: machinability and tool life," *International Journal of Material Forming*, vol. 3, no. 1, pp.507–510, 2010. doi:10.1007/s12289-010-0818-9
- [11] P. Chockalingam and L.H. Wee, "Surface roughness and tool wear study on milling of AISI 304 stainless steel using different cooling conditions," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no 8, pp. 1386-1391, August 2012.
- [12] E. Şirin and Ş. Şirin, "Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel," *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 2, no. 1, pp. 75-84, 2021.
- [13] Ç. V. Yıldırım, "Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316'nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, pp. 326-341, 2019. doi:10.29130/dubited.442148.
- [14] E. Kuram, "AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde farklı kaplama malzemelerinin takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri," *Politeknik Dergisi*, cilt 19, sayı 4, ss. 433-443, 2016.
- [15] E. Altınkaya ve A. Güllü, "AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde kesme hızının ve takım kaplamasının takım

aşınmasına etkileri," *Politeknik Dergisi*, cilt 11, sayı3, ss. 243-247, 2008.

[16] R. Çakıroğlu ve G. Uzun "Yüksek ilerleme ile frezeleme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağları ile modellenmesi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 7, sayı 1, ss. 58-66, 2021.

[17] S.Y. Jin, A. Pramanik, A.K. Basak, A.K. C. Prakash, S. Shankar and S. Debnath "Burr formation and its treatments—a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, pp. 2189–2210, 2020. doi:10.1007/s00170-020-05203-2.

[18] J.C. Aurich, D. Dornfeld, P.J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz and S. Min, "Burrs-analysis, control and removal," *CIRP Annals*, vol. 58, no. 2, pp. 519-542, 2009. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.004.

[19] L.C. da Silva, P.R. da Mota, M.B. da Silva, M.B. W.F. Sales, A.R. Machado and M.J. Jackson, "Burr height minimization using the response surface methodology in milling of PH 13-8 Mo stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, pp. 3485–3496, 2016. doi:10.1007/s00170-016-8747-5.

[20] T.R. Lin, "Experimental study of burr formation and tool chipping in the face milling of stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, pp. 12-20, 2000. doi:10.1016/S0924-0136(00)00573-2.

[21] L.C. da Silva, P.R. da Mota, M.B. da Silva, E.O. Ezugwu and A.R. Machado, "Study of burr behavior in face milling of PH 13-8 Mo stainless steel," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 8, pp. 34-42, 2015. doi:10.1016/j.cirpj.2014.10.003.

[22] P.P. Saha and S. Das, "Minimization of exit burr in face milling of medium carbon steel by exit edge beveling," *Production Engineering Research and Development*, vol. 8, pp. 469–476, 2014. doi: 10.1007/s11740-014-0550-2.

[23] U. Heisel, M. Schaal and G. Wolf, "Burr Formation in milling with minimum quantity lubrication," *Production Engineering Research and Development*, vol. 3, no. 1, pp. 23-30, 2009. doi:10.1007/s11740-008-0138-9.

[24] Uzun G. and R. Çakıroğlu, "Yüksek ilerlemeli frezeleme işleminde işlenebilirlik parametrelerinin incelenmesi," *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 1, no. 1, pp. 34-41, 2020.

[25] G. Liu, B. Zou, C. Huang, X. Wang, J. Wang and Z. Liu, "Tool damage and its effect on the machined surface roughness in high-speed face milling the 17-4PH stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, pp. 257–264, 2016. doi:10.1007/s00170-015-7564-6.

[26] C.C. Chen, N.M. Liu, K.T. Chiang and H.L. Chen, "Experimental investigation of tool vibration and surface roughness in the precision end-milling process using the singular spectrum analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, pp. 797-815, 2012. doi:10.1007/s00170-012-3943-4

[27] G. Singh, M.K. Gupta, H. Hegab, A.M. Khan, Q. Song, Z. Liu, M. Mia, M. Jamil, V.S. Sharma, M. Sarikaya and C.I. Pruncu, "Progress for sustainability in the mist assisted cooling techniques: a critical review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.109, pp. 345–376, 2020. doi:10.1007/s00170-020-05529-x.

[28] A. Çetin, "Çelik döküm parçalarda kalıntı (inklüzyon) kaynakları," www.dokumhane.net, [Online]. Available: <https://dokumhane.net/kutuphane/celik-dokum-parcalarda-kalinti-inkluzyon-kaynaklari/>. [Accessed: Oct. 25, 2021].

[29] S. Hajiahmadi, "Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316L," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 2, pp. 296-304, 2019, doi:10.1016/j.ijlmm.2019.07.004.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

A New Mode of Urban Transportation: E-scooter and Suggestions for Application Türkiye

Hazal GÜLDÜR^a, Fatih KARAÇOR^b, Seda HATİPOĞLU^c, M. Kürşat ÇUBUK^d

Submitted: 06.11.2021 Revised: 31.03.2021 Accepted: 11.04.2021 doi:10.30855/gmbd.2022.01.04

ABSTRACT

Keywords: Micromobility, Shared e-scooter, Sustainable Urban Transport

^a Gazi University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
06570 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3064-8476

^b Gazi University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
06570 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1201-7857

^c Gazi University,
Traffic Planning and
Implementation
06500 - ANKARA, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4511-1914

^d Gazi University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
06570 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8155-7123

*Corresponding author:
fatihkaracor@gmail.com

Micromobility devices such as shared bicycle and scooter systems, have come to the fore as an alternative urban transportation system in recent years. The e-scooter system emerges as a type of transportation that is widely used in the world in a short time due to the flexibility and ease of use it provides. The use of e-scooters in the world literature is investigated in terms of; demography, travel time, journey distance, the purpose of travel, safety problems, environmental effects, legal regulations and applications. The most important findings are that the user age range is between 16-60 years, they are generally used in short distance (~2 km) and short-term (<11 min) journeys, and they cause a mode shifting as a new type of transportation. In terms of safety, it has been observed that more than half of the accidents are caused by the user. In order for e-scooters to be included in urban mobility plans as a mode of transportation rather than being an entertainment and leisure activity, the legal basis of the system should be established. In this study, the evaluation and examination of the e-scooter as a type of urban transportation was made with the data obtained from e-scooter studies and applications in the world and Turkey, and suggestions for implementation and supervision were presented. By examining the relevant legal regulations in the cities of the world, it has been suggested to introduce different regulations according to the infrastructure of the cities in Turkey. Since there are very few studies on the subject in Turkey, it is thought that this study will contribute to the literature and form the basis for future studies.

Yeni Bir Kent İçi Ulaşım Türü: E-skuter ve Türkiye için Uygulama Önerileri

ÖZ

Mikromobilite olarak sınıflandırılan paylaşımlı bisiklet ve skuter sistemleri, son yıllarda, alternatif bir kent içi ulaşım sistemi olarak gündeme gelmiştir. E-skuter sistemi, sağladığı esneklik ve kolay kullanımı sebebiyle kısa sürede dünyada oldukça fazla kullanılan bir ulaşım türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya literatüründeki e-skuter kullanımı; demografi, yolculuk süresi, yolculuk mesafesi, yolculuk amacı, güvenlik sorunları, çevresel etkileri, yasal düzenleme ve uygulamaları başlıkları altında incelenmiştir. Kullanıcı yaş aralığının 16-60 yaş aralığında dağılım gösterdiği, genelde kısa mesafeli (~2 km) ve kısa süreli (<11 dk) yolculuklarda kullanıldıkları ve yeni bir ulaşım alternatifi olarak tür geçişine sebep oldukları elde edilen en önemli bulgulardır. Güvenlik açısından, kazaların yarısından fazlasının kullanıcı kaynaklı olduğu gözlenmiştir. E-skuterların eğlence ve boş zaman aktivitesi olmaktan çıkarılıp bir ulaşım türü olarak kentsel hareketlilik planlarında yer alması için sistemin yasal zemininin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada dünyada ve Türkiye’de yapılmış e-skuter çalışmalarından ve uygulamalarından elde edilen veriler ile bir kent içi ulaşım türü olarak e-skuterin değerlendirilmesi ve incelenmesi yapılmış ve uygulama ve denetim için öneriler sunulmuştur. Dünya kentlerindeki, ilgili yasal düzenlemeler incelenerek Türkiye’de kentlerin alt yapısına göre farklı düzenlemeler getirilmesi önerilmiştir. Türkiye’de konu ile ilgili çok az sayıda çalışma olması sebebiyle bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı ve sonrasında yapılacak çalışmalara temel oluşturacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler:

Mikromobilite,
Paylaşımlı e-skuter,
Sürdürülebilir Kentel Ulaşım

1. Giriş (Introduction)

Tüm dünyada, gerek nüfus gerekse mekânsal dağılım açısından eski kırsaldan kentsel yerleşimlere geçiş olarak tanımlanan bir kentleşme süreci yaşanmaktadır. Birleşmiş Milletler Dünya Kentleşme Beklentilerine göre, 2018 yılında dünya nüfusunun %55'i kentsel alanlarda ikamet ederken, 2050 yılına kadar kentsel bölgelerdeki bu nüfus artışının %68'e ulaşması beklenmektedir [1, 2]. Artan nüfusla birlikte kentler daha fazla kaynak tüketmeye başlamıştır. Şehirler, dünyadaki enerji kaynaklarının %70'inin tüketiminden ve sera gazı (GHG) emisyonlarına katkıdan sorumludur [3-45]. Bu tüketim, kentsel bölgeler için verimlilik, güvenilirlik ve güvenlik sağlamayı amaçlayan sürdürülebilir kalkınma çalışmaları ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Sürdürülebilir kentsel ulaşım modelleri, kent içi ulaşımının sürdürülebilirliğin gerektirdiği çevresel, ekonomik ve toplumsal önlemlere göre tasarlanmasını hedeflemektedir. Çevresel boyutta bu hedefler; ulaşım kaynaklı emisyonların, hava ve ses kirliliğinin azaltılması, sürdürülebilir yakıt ve enerji kullanımının desteklenmesi ve arazi kullanımının planlanması olarak özetlenebilir. Ekonomik anlamda verimlilik, satın alınabilirlik ve ekonomik büyüme; toplumsal anlamda ise refah düzeyi, fırsat eşitliği, sosyal dayanışma ve beşeri sermayenin korunmasıdır. Bu hedeflerin sağlanmasının en uygun yolu özellikle özel araç kullanımının azaltılarak insanların toplu taşıma sistemlerine yönlendirilmesi olarak görülmektedir. Ancak toplu taşıma ağlarının yeterince esnek olmaması ve insanlara kapıdan kapıya seyahat imkanı sağlamaması, bu türün özel araca tercih edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple son yıllarda mikromobilité olarak sınıflandırılan paylaşımlı bisiklet ve skuter sistemleri alternatif bir kent içi ulaşım sistemi olarak gündeme gelmiştir [6-78]. Özellikle skuter sistemi, sağladığı esneklik ve kolay kullanımı sebebiyle kısa sürede dünyada oldukça fazla kullanılan bir ulaşım türü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada dünyada ve Türkiye'de yapılmış olan e-skuter çalışmalarından ve uygulamalarından elde edilen veriler ile bir kent içi ulaşım türü olarak e-skuterin değerlendirilmesi ve incelenmesi yapılmıştır. E-skuterların eğlence ve boş zaman aktivitesi olmaktan çıkarılıp bir ulaşım modeli olarak kentsel hareketlilik planlarında yer alması için sistemin düzenlenmesi ve doğru bir şekilde denetlenmesi gerekmektedir. Çalışmanın amacı; e-skuter uygulamasının bir kent içi ulaşım türü olarak düzenlenmesi ve planlanması için sistematik önerilerde bulunmaktır.

2. Mikromobilité Ve E-Skuter (Micromobility And E-Scooter)

Mikromobilité, oldukça yeni bir kavram olup, tanımı gün geçtikçe geliştirilmektedir. En genel tanımıyla mikromobilité: özellikle elektrikli skuter, bisiklet gibi hafif araçların kiralanarak ve ya sahip olunarak kent içinde kısa mesafeli/kısa süreli ulaşım aracı olarak kullanıldığı bir sistemdir [9, 10]. Uluslararası Taşımacılık Federasyonu (ITF) tarafından Şubat 2020'de yayınlanan Güvenli mikromobilité raporunda ise mikromobilité; "350 kg'a kadar olan ve varsa güç kaynağı kademeli olarak azaltılan ve 45 km/sa'den yüksek olmayan belirli bir hız sınırında kesilen cihaz ve araçlarla yapılan ulaşımdır. Mikromobilité, bisiklet, paten, kayak ve itme skuter gibi yalnızca insan gücüyle çalışan araçların kullanımını içerir." şeklinde tanımlanmaktadır [11, 12].

Mikromobilitenin kanıtlanmış ilk etkileri arasında; hareketliliğin arttırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, otomobil kullanımının düşürülmesi, ekonomik kalkınma ve sağlık açısından faydaları sayılabilir [13].

Kentsel ulaşım planlamasında son yıllarda önem kazanan ilk mil ve son mil (first and last mile) ulaşımı açısından da mikromobilitenin sunduğu ve sunacağı çözümler oldukça faydalı olarak görülmektedir. İlk mil bir yolcunun evinden çıkıp, özel araç hariç kullanacağı ilk toplu taşıma aracına ulaşması için gereken mesafedir. Aynı şekilde son mil de toplu taşıma aracından sonra ulaşmak istediği lokasyona kadar olan mesafe olarak tanımlanmaktadır. Toplu taşıma ulaşım ile ilgili sorunların özel araç sahipliğini ve kullanımını arttırdığı düşünüldüğünde, mikromobilité çözümlerinin devreye girmesi, hem daha sürdürülebilir hem de daha yaşanılabilir kentsel alanların yaratılmasında katkı sağlayacaktır [14-16].

Mikromobilité sisteminin içinde yer alan elektrikli skuter veya e-skuter, iki veya daha fazla tekerleği olan ve araç hareket halindeyken kullanıcı veya operatörün araç üzerinde ayakta durması için

tasarlanmış ve en yüksek 40 km/sa hıza ulaşabilen elektrikli araçlar olarak tanımlanmaktadır. Moped tipi e-skuterlar ile karışmaması için bu araçlar literatürde Elektrik destekli itme skuter (e-kick-scooter) kic olarak tanımlanmaktadır.

E-skuterların, birkaç kilometreye kadar kullanım imkanı sunmaları sebebiyle, diğer ulaşım türlerine alternatif oluşturabilecekleri öngörülmektedir. Birkaç kilometreye kadar kullanımda, fiziksel aktivite de sınırlı olduğu için, özel araç kullanımına bile alternatif olabilecekleri savunulmuştur [17]. Avusturya’da günlük çıkan Der Standard gazetesinin haberine göre kiralama sistemlerinde ve kişisel e-skuter sahipliğinde bir artış gözlemlenmektedir. E-skuter sistemleri kalabalık şehirlerde kentsel hareketliliğe katkı sağlarken, hem bir öğrencinin hem de bir yöneticinin kullanabileceği aslında “eğlenceli bir aktivite” olarak da tercih edilmektedir [18]. Bu anlamda erişilebilirlik bakımından oldukça büyük bir avantaja sahip oldukları söylenebilir. Smith ve Schwieterman [7] tarafından yapılan çalışmada, e-skuter sistemlerinin hanelerdeki araç sayısında düşüş yaratma potansiyeline sahip olduğu savunulmuştur.

Yolculuk karakteristiklerine bakılarak, e-skuter sistemlerinin yürüme ile bisiklet kullanımı arasında yer aldığı söylenebilir. Yapılan çalışmalarda kişisel yolculukların %35’inin 2 km’den ve %75’inin 10 km’den daha kısa olduğunu belirlenmiştir [19]. E-skuterlar ortalama olarak 0.5-4 km arası kullanılmakta olup, bu da yaklaşık 5-45 dakika yürümeye karşılık gelmektedir [20, 21].

Almanya’da yapılan bir çalışmada e-skuter kullanımının avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir [22]. Bu çalışmaya göre hareketteki hızlanma, her tür kamusal alanda kullanılabilirliği (toplu taşıma araçları dahil), park et devam et sistemi içinde kullanılabilirliği, özel bir kıyafet gerektirmemesi ve yaştan bağımsız olması avantajları arasında sıralanırken, dalgalı arazide verimsiz ve tehlikeli oluşu, taşınacak eşya anlamında sınırlı oluşu ve hava durumuna çok bağımlı oluşu dezavantajları arasında yer almıştır.

Günümüzde elektrikli skuter paylaşım sisteminin çalışma şekli şirketler bazında ciddi farklılıklar göstermemektedir. Akıllı telefonlarından, kendilerine en yakındaki elektrikli skuterin yerini görebilen kullanıcı, skuter üzerindeki QR kodunu akıllı telefon uygulamasına taratarak yolculuğuna başlamakta ve ücretlendirme yolculuk süresi boyunca devam etmektedir. Yolculuğunu tamamlayan kullanıcı, skuteri uygun bir noktada kilitlemekte ve yine akıllı telefon uygulamasını kullanarak yolculuğu sonlandırmaktadır. Şarjı biten skuterler ilgili şirket tarafından şarj edilmek üzere toplanmakta ve kullanıma hazır olduklarında, şirket tarafından uygun görülen bir noktaya yeniden kullanım için bırakılmaktadır [23, 24].

Elektrikli skuter paylaşım sistemlerinin bisiklet paylaşım sistemlerine kıyasla en büyük avantajı, yolculukların belirli bir merkezden başlayıp bitmek zorunda olmaması, yuvasız sistemlere sahip olmalarıdır [25]. Ancak bu esneklik, uygulamada, kullanımda ve güvenlikte bazı sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Uygulama ve kullanıma ait yasal düzenlemeler hala tartışmalı olup, e-skuter sistemlerinin hangi araç sınıfında değerlendirilmesi gerektiği, kullanım koşulları (kasklı/kasksız, yaş sınırlaması, hız sınırı, trafikteki hangi kurallara tabi oldukları vb. konular) ve hatta e-skuterların güvenli olarak hangi yolları kullanabilecekleri hususları henüz netleştirilmemiştir.

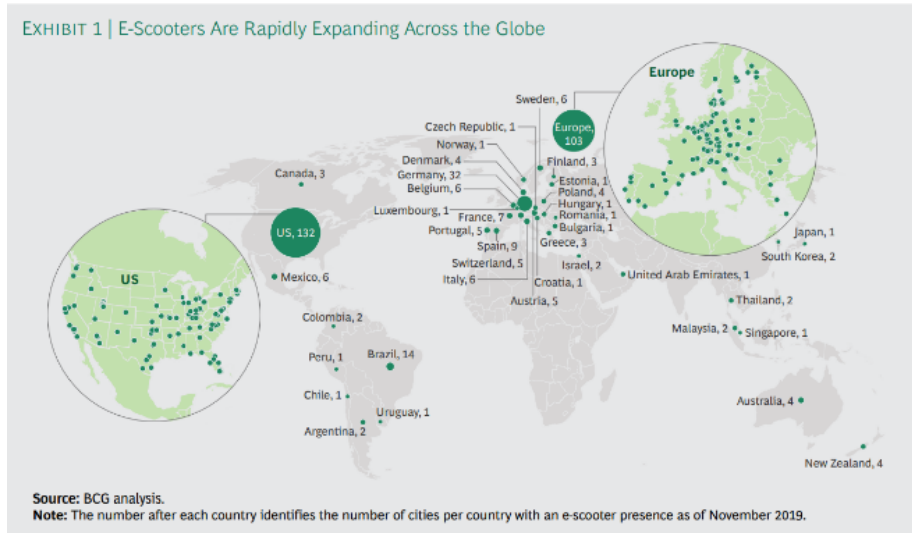
3. Dünyada E-Skuter Kullanımı (E-Scooter Use In The World)

Paylaşımlı e-skuter sistemleri, Amerika ve Avrupa’da son yıllarda hızla artan kullanım oranıyla dikkat çekmektedir. Kasım 2019 itibari ile ülkelerde e-skuter kullanımı olan şehir sayıları Şekil 1’de [26] gösterilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri’nde e-skuterlar 2017 senesinde ortaya çıkmış ve 2018 senesinin sonlarında ise toplam mikromobillitenin yarısını oluşturmuştur. 2018 itibariyle 100’ün üzerinde şehirde toplamda 85000 e-skuter hizmet vermektedir. 2017 verileri ile karşılaştırıldığında ise kullanımın bir sene içerisinde ikiye katlandığı belirtilmiştir [27].

Paris, Haziran 2018’de paylaşımlı e-skuter’lar ile tanışan ilk Avrupa şehri olmuştur. Sadece bir yılsonunda, şehirde on üç operatör ve 22.000’den fazla araçtan oluşan bir filo oluşturulmuştur [28]. Lime [29] verilerine göre e-skuter yolculukları 2019’da 100 milyonu aşmıştır ve 2019’a kadar Madrid, Prag ve Yunanistan’da e-skuter kullanılarak 1 milyondan fazla yolculuk yapılmıştır.

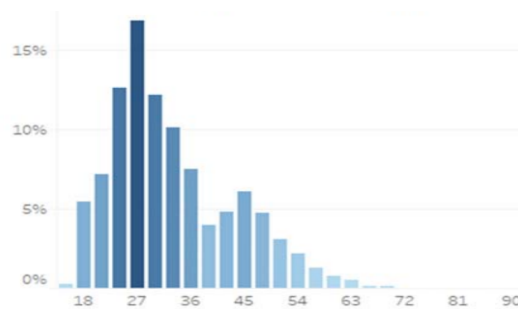
Toplumlarda insanlar tasarruf amaçlı araç paylaşımı ve toplu taşıma hizmetlerinden yararlanmaktadır. Dünya genelinde yayılan COVID-19 salgını sebebiyle bu hizmetler sekteye uğramıştır. İnsanlar temastan ve toplu taşıma yolculuklarından kaçınmıştır ve bu süreçte e-skuter hizmetine talep artış göstermiştir. Birçok şehirde (Roma, Rotterdam, Milano, Braga ve ABD) e-skuter'ın tür geçişi için oldukça iyi bir seçenek olduğu gösterilmiştir. Ayrıca Braga'da pandemi sürecinde yönetim tarafından verilen destekler ile pandemi öncesinde kurulmuş olan e-skuter sistemine 500'den fazla e-skuter katılarak filo genişletilmiş ve fiyatlarda hükümet destekli indirimler yapılmıştır [30-32]. Asya'da ise 2019'un ikinci döneminde Güney Kore'de e-skuter'lar kullanılmaya başlanmıştır [33].



Şekil 1. Kasım 2019 itibari ile ülkelerde e-skuterin mevcut olduğu şehir sayısı [26]
(Number of cities with e-scooter systems as of November 2019)

3.1. Kullanıcı yaş dağılımı (User age distribution)

Almanya şehirlerinde yapılmış bir çalışmada e-skuter kullanıcılarının yaş dağılımı Şekil 2'de verilmiştir [17]. Çalışmada yaş dağılımı tüm kullanıcılara göre belirlenmiş ve 21-36 yaş arası, kullanım oranının en fazla olduğu yaş aralığı olarak belirlenmiştir. 63 yaşa kadar da yüzdelik dilime girebilecek kullanım oranı mevcuttur.



Şekil 2. E-skuter kullanıcılarının yaş dağılımı [17] (E-scooter users' age distribution)

Benzer çalışmaları ABD'nin Portland ve Santa Monica şehirlerinde de gerçekleştirilmiştir. Portland şehrinde kullanım oranı 16-29 yaşlarında %34,9, 30-39 yaşlarında %37,6, 40-49 yaşlarında %17,5 ve 50 yaş üzerinde %10 olarak belirlenmiştir [34]. Santa Monica şehrinde bu oranlar, 25 yaş altı için %23,8, 25-34 yaş arası için %41,7, 35-44 yaş aralığı için %20,1 ve 45 yaş üstü için %14,4 olarak hesaplanmıştır [35].

3.2. Yolculuk süresi ve mesafesi (Trip duration and distance)

Yolculuk amacı ve süresi de kullanımın değerlendirilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu yönde yapılan çalışmalar şehirler arasında farklı değerlendirmelerin yapılabileceğini göstermektedir. Badia ve Jenelius [36] tarafından yapılmış olan bir çalışmada yolculuk mesafesi, yolculuk süresi ve ticari hız

verileri karşılaştırılmıştır. Ortalama yolculuk mesafesi en düşük olan Osla'da 1 km ve en yüksek olan Fransa'da ise 4,7 km olarak hesaplanmıştır. Yolculuk süresi de Austin'de minimum 7,6 dakika ve San Francisco'da 20 dakika olarak belirlenmiştir. Yolculuk mesafesi ile yolculuk süresi arasındaki fark, büyük oranda ticari hızdan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmalarda ortalama hız 8 km/sa olarak belirlenmiştir. Santa Monica şehrinde ortalama yolculuk süresi 14 dakika ve ortalama yolculuk mesafesi 1,3 mil olarak hesaplanmıştır [35].

Fransa'da yapılan bir çalışma, uzun süreli yolculukların genelde eğlence amaçlı yolculuklar olduğunu savunmaktadır. Bu yolculuklar sırasında, sürücülerin süreyi önemsemediği ve sıklıkla durduğu belirlenmiştir. Belirli bir varış noktası hedeflenerek belirli bir amaçla e-skuter kullanan sürücüler ise duraksamadan gitmektedir. Bu bağlamda, haftasonu yapılan yolculukların, hafta içi yapılan yolculuklara kıyasla daha uzun sürdüğü belirlenmiştir [37].

Yine Amerika Ulusal Şehir Ulaşım Görevlileri Birliği (NACTO) raporuna göre paylaşımlı araçların ortalama kullanımının 11-12 dakika ve 1,5-2,5 km arasında gerçekleştiği rapor edilmiştir [27].

3.3. Yolculuk amacı (Trip purpose)

Badia ve Jenelius [36] yaptıkları çalışmada e-skuterların yolculuk amacına odaklanarak, farklı şehirlerden elde edilen sonuçları derlemiştir. Yolculuk amacı için altı farklı kategori belirlenmiştir: iş (işe gidiş, işle ilgili yolculuklar ve eğitim), toplu taşıma (duraklara/istasyonlara bağlantı), sosyal/eğlence (restoranlar, aile ve arkadaş ziyaretleri vb.), eğlence/dinlenme, alışveriş/kişisel ihtiyaç (örneğin, sağlık randevuları) ve diğer yolculuklar. Çalışma kapsamında e-skuter yolculuklarının temel kullanım amacının, sosyal/eğlence (%29), eğlence/dinlenme (%19) ve alışveriş/kişisel ihtiyaç (%15) olmak üzere %63'ünün rekreasyonel yolculuklardan oluştuğu görülmektedir. Bunu, %25 ile iş/educational yolculukları, %9 ile toplu taşıma erişim yolculukları ve %3 ile diğer yolculuklar takip etmektedir.

Daha önce de ifade edildiği gibi e-skuter ulaşım davranışı kentten kente değişiklik göstermektedir. Örneğin, Oslo (%39) ve Denver (%46) şehirlerinde e-skuter ile yapılan iş/educational yolculukları oranları, %25 olan ortalamanın çok üstünde seyretmektedir.

Santa Monica'da e-skuter kullanım amacı, %33,2 iş/educational, %22,2 rekreasyon ve eğlence, %15 sosyal/eğlence, %14,5 toplu taşıma erişim ve %12 alışveriş/kişisel ihtiyaç olarak belirlenmiştir [35].

3.4. Ulaşım türü değişimi (Mode shift)

Paylaşımlı sistemlerin kullanımının özel araç kullanımını azalttığı yönündeki iddiaları destekleyecek kesin veri henüz bulunmamakla birlikte yapılan anketlerden elde edilen veriler bunu destekleyen yöndedir. Amerika'da bazı eyaletler özelinde yapılan bir çalışmada kullanıcıların %45'i, paylaşımlı skuter sisteminin olmaması durumunda yolculuklarını özel araçla yapacaklarını bildirmişlerdir. Tür paylaşımında e-skuterların yerini aldığı ikinci tür %28 ile yaya ulaşımı olarak raporlanmıştır [27,38].

Badia ve Jenelius [36] yaptıkları çalışmada e-skuterların hangi ulaşım türünün yerine geçtiğini araştırmışlardır. Uygulanan ankette "E-skuterin olmaması durumunda hangi ulaşım türünü kullanırdınız?" sorusuna yer verilmiş ve cevaplar yaya ulaşımı, özel araç ve araç paylaşımı, toplu taşıma ve bisiklet olmak üzere dört farklı ulaşım türünde toplanmıştır. Sonuçlar, Amerika ve Avrupa şehirleri arasında net bir ayrım göstermektedir. Amerika'da, özel araç yolculukları, farklı biçimleriyle (özel araç ve özel araç paylaşımı) %44'lük bir payla e-skuterların yerini aldığı ana ulaşım türüdür. Bunu %39 ile yaya ulaşımı, %9 ile toplu taşıma ve %8 ile bisiklet takip etmektedir. Avrupa'da ise ana alternatifin %44 ile yaya ulaşımı, ikinci alternatifin %33 ile toplu taşıma olduğu görülmektedir. E-skuter olmadığında tercih edilecek alternatif ulaşım türleri dağılım oranları Amerika ve Avrupa şehirleri için Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kullanım alanı dışında E-skuter kullanıcılarının alternatif tür seçimi dağılımı
(Distribution of e-scooter users' modal shift)

Alternatif Tür	Amerika şehirleri	Avrupa şehirleri
Yaya ulaşımı	%39	%44
Özel araç ve araç paylaşımı	%44	%13
Toplu taşıma	%9	%33
Bisiklet	%8	%10

Portland'da yapılan bir çalışmada e-skuter kullanıcılarının, %44,1 daha az taksi, %38,6 daha az özel araç ve %31,5 daha az araç paylaşım sistemi kullandığı tespit edilmiştir [34]. San Francisco'da yapılan pilot bir çalışma sonucunda e-skuter yolculuklarının %34'ünün toplu taşıma besleyici sistem olarak kullanıldığını ve e-skuter sistemi olmaması durumunda kullanıcıların büyük bir çoğunluğunun toplu taşımayı da kullanmayacağı raporlanmıştır [39].

Chicago eyaletinde yapılan bir çalışmada e-skuter kullanılarak yapılan 30000 rastgele yolculuk 3 farklı coğrafi bölge arasında incelenmiştir. 0,5-2 mil arasındaki yolculuklarda e-skuter kullanımının otomobil kullanımına göre güçlü bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Özellikle park yeri ile ilgili sorunların olduğu bölgelerde e-skuter kullanımının, motorsuz taşıt kullanımı oranını %47'de %75'e yükselteceği tespit edilmiştir [7].

3.5. Güvenlik (Safety)

Bütün mikromobilité araçlarında olduğu gibi e-skuterlar için de en büyük tehlike güvenlik ile ilgili sorunlardır [25,40,41]. 2013-2015 yılları arasında İsrail'de yapılan bir çalışmada, hastaneye başvuru gerektiren trafik kazaları içinde e-bisiklet veya e-skuter içeren kazalar değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya göre mikromobilité araçlarında gerçekleşen trafik kazalarının toplam trafik kazalarına oranı yaklaşık üç sene içerisinde altı katına çıkmıştır [42].

Benzer şekilde 2004-2010 yılları arasında Çin'de e-bisiklet kazalarının yaralanma oranının 4 kat, ölümlü kaza oranının ise 6 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu değerlendirmeler incelenirken mikromobilité araçlarının trafikteki payının artışı da göz ardı etmemek gerekir. Bu artışla birlikte, hız, araç yolu ihlali ve kask kullanımının yetersizliği de kazalarda büyük rol oynamaktadır. Güvenliğin artırılması için kullanım koşullarının belirlenmesi ve denetlenmesi kadar yol kullanıcılarının ve mikromobilité araç kullanıcılarının da sorumluluklarını yerine getirmesi büyük önem arz etmektedir [43, 44].

Çin'de yapılan bir başka çalışmada hız kontrolüne sahip 800 e-bisiklette %70,9 oranında hız limitinin (20 km/sa) aşıldığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen 20647 e-bisiklet kullanıcılarından %38,3'ünün kavşak girişlerinde kurallara uygun davranmadığı ve yalnızca %2,2'sinin kask kullandığı belirlenmiştir [45].

Austin şehrinde e-skuter kullanımına bağlı yaralanmalar ile ilgili yapılmış çalışmada, her 100000 yolculuktan 20 tanesinin yaralanma ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Yaralanmaların yaklaşık üçte biri e-skuteri ilk kez kullananlar tarafından gerçekleşmiştir. %48'i baş yaralanması ile sonuçlanırken, %50'sinde yol hatasının (çukur, bozukluk vb.) etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yine yolculukların üçte birinin aşırı hız kaynaklı olduğu da raporlanmıştır [46].

2020 senesinde Münih, Barselona ve İsrail tarafından sağlanan istatistiki bilgiler ve trafik kazaları araştırması konusunda 22 uzmanın doldurduğu anket ile, e-mikromobilité kazalarının en sık nedenlerini ve ciddiyetini belirlemek için bir çalışma yapılmıştır. Veriler, trafik uzmanları tarafından incelenmiş ve kazaya sebep olan dört temel unsur belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, e-skuter kazalarının %56'sının araç sürücüsünden kaynaklandığı belirlenmiş ve bunu %15 ile araç kaynaklı, %14 ile yol kaynaklı ve %15 ile diğer aktörlerden kaynaklı kazalar takip etmiştir [47].

Kazaya sebep olan her unsur kendi içinde incelendiğinde sürücülerden kaynaklı kazaların nedenleri;

- Trafik işaretlerine ve önceliklerine uyulmaması (%18)
- Kontrolü kaybetme ve araçtan düşme (%11)
- Uygun olmayan sürücü yaşı (%11)
- Kaldırımlarda ve diğer yaya alanlarında araç kullanmak (%10)
- Diğer e-skuterlardan ve bisikletlerden yetersiz ayırma (%3) olarak belirlenmiştir.

Araç kaynaklı kazaların nedenleri;

- Araç görünürlüğünün olmaması: zayıf ışıklar ve/veya optik reflektör eksikliği (%27)
- Kaldırım kusurları ve geçişlerle başa çıkmak için tekerlek boyutu ve özellikleri (%27) olarak belirlenmiştir.

Yol kaynaklı kazaların nedenleri;

- Yetersiz şerit ayrımı (%51)
- Yoldaki tümsekler, bozulmalar ve engeller gibi kaplama kusurlarının (%29) olarak belirlenmiştir.

Diğer nedenler;

- Trafik işaretlerine veya geçiş önceliğine uymayan diğer araçlar (%36)
- E-skuter'ların daha hızlı/daha büyük araçlar tarafından ezilmesi (%33)
- E-skuter şeritlerinin yayalar tarafından işgal edilmesi (%20) olarak belirlenmiştir.

3.6. Çevre (Environment)

Son yıllarda insanlığın karşı karşıya olduğu temel sorunlardan biri iklim değişikliğidir. İnsanlar tarafından üretilen kirliliğin ve karbondioksitin (CO₂) iklim değişikliğini hızlandığı iyi bilinmektedir. Bunun ana nedeni, toplamda %31 ile motorlu taşıt ulaşımından kaynaklı karbondioksittir [18, 48].

Elektrikli araçlar, çevre kirliliği açısından özellikle kullanım sırasında sera gazı yaratmadığından daha çevre dostu olarak görülmektedir. Bu anlamda çevre dostu taşıtlar olarak sürdürülebilir kentsel tasarımın yapı taşlarını oluşturmaktadırlar. Karşılaştırma yapıldığında, elektrikli olanların fosil yakıt kullananlara göre daha çevre dostu olduğu söylenebilir. Ancak üretimden kullanıma bütün aşamalar göz önünde bulundurulduğunda özellikle e-skuterlar için tamamen çevre dostu demek için yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesini kullanarak, bu mobilite seçeneğinin küresel ısınma, asitleşme, ötrofikasyon ve solunumla ilgili toplam çevresel etkilerini araştıran bir çalışmada, e-skuterın şarj edilmesi sonucu oluşan çevresel yükün, e-skuterların malzeme ve üretiminden kaynaklı ve gece şarj istasyonlarına taşınmasından kaynaklı etkilere göre çok az olduğu bulunmuştur. Küresel ısınmaya ortalama etkisi 202 g. CO₂-eq/yolcu-km olarak hesaplanmış ve bu değer %50'sinin malzeme ve imalat, %43'ünün ise toplama ve dağıtımdan kaynaklandığı belirlenmiştir [28, 49-52].

Stockholm tabanlı e-skuter şirketi VOI, İngiltere'de hizmet vermeye başladığında, e-skuterların kullanımı sonrası karbon emisyonunda 1,6 milyon ton azalma olduğunu ilan etmiş ancak gerçek değer yalnızca 1600 ton olduğu ortaya çıkınca iddiasını geri çekmek zorunda kalmıştır [53].

E-skuter üreticileri sundukları hizmetin diğer ulaşım araçlarına göre daha çevre dostu olduğunu savunmaya devam etse de, Lufthansa Innovation Hub tarafından yapılan bir araştırmada, üretim, altyapı, bakım ve operasyon süreçleri göz önüne alınarak mevcut sistemler sıralanmış ve e-skuter sistemlerinin aslında beklediği kadar çevreye duyarlı olmadığı ortaya çıkmıştır. Ulaşım türüne göre karbon emisyonu sorulduğunda en yüksek değer benzinli arabalar için 210 g/km olarak hesaplanmıştır. Moped türü sistemlerde bu değer 21 g/km iken e-skuterlar elektrikli arabalardan hemen sonra 102g/km değeriyle yer almaktadır [54].

Paylaşımlı e-skuter sistemlerinde, e-skuterların ömrü ilk olarak 2-3 ay olacak şekilde hizmete başlanmıştır. Daha sonra, değiştirilebilir piller yardımı ile bu süre 12-24 aya kadar uzatılmıştır [26]. İmalat sırasında oluşan emisyonların engellenmesi, e-skuter sistemlerinin çevresel açıdan diğer türler ile rekabet edebilmesi için önemlidir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, e-skuterların ömrü 9.5 ay olarak hesaplanmış ve diğer türlerin alternatifi olarak yer alabilmesi için bu sürenin en azından bir seneye yaklaşması gerektiği vurgulanmıştır [23]. İki yıllık bir kullanım ömrü, malzemelerden kaynaklanan çevresel etkinin önemli ölçüde azaltılmasına olanak tanıyacaktır [55].

3.7. Yasal düzenleme (Legal regulations)

E-skuterlarla ilgili yasal düzenlemeler, yeni olsa da trafikteki yeri ve kullanım şekli özel olarak tam anlamıyla henüz tanımlanmamıştır. Kullanım kuralları, ülkeden ülkeye hatta şehirden şehre farklılık göstermektedir. Carrignon [56] yaptığı çalışmada yeni ulaşım sistemlerinin kullanımına ve gerekli altyapı sistemlerinin kurulumuna başlamadan önce yeterli olgunluğa erişmeleri gerektiğini belirtmiştir. Aynı çalışmada otomobillerin karayolu ulaşım türü olarak belirlenmesinden sonra standartlarının ihtiyaçlara cevap verebilmek için geliştirilmeye başladığına ve bu standartların 30 yılın sonunda belirlendiğine dikkat çekilmiştir. Bu anlamda e-skuter sistemlerinin uygulanması ve geliştirilmesi için öncelikle ulaşım aracı olarak kabul görmesi, tanınması ve güvenlik tanıtılması gerekmektedir.

Avrupa Birliği ülkelerinde e-skuter kullanımı ile ilgili yasal düzenleme çalışmaları 2020 itibari ile yapılmaya başlanmıştır [57]. Tablo incelendiğinde uygulama ve kısıtlamaların oldukça farklılık

gösterdiği görülmektedir. İrlanda e-skuter kullanımını kamusal alanda tamamen yasaklarken, Bulgaristan, Estonya gibi bazı ülkeler yasal olarak tanımadan kullanımına izin vermektedir. Yunanistan, Macaristan ve Polonya’da e-skuterlar yasal olarak tanımlanmamaktadır. Estonya, Letonya, Portekiz, Lüksemburg ve Romanya’da ise yasal olarak tanınmakla birlikte e-skuterlara özel düzenleyici yönetmelik bulunmamaktadır. Litvanya, Danimarka, Finlandiya, Çek Cumhuriyeti ve Portekiz’de ise uygulamada, e-skuterlar bisikletler ile aynı kurallara tabi tutulmuştur. Bu serbest yaklaşımın aslında gerekli yasal düzenlemelerin eksikliğinden ve belki de altyapı yetersizliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Hız limitleri neredeyse tüm ülkelerde 20-25 km/sa olarak belirlemiştir. E-skuter sürücülerinin kullanabilecekleri yollar karşılaştırıldığında, bazı ülkelerin yaya alanlarında kullanımın tamamen yasakladığı, bazı ülkelerin bu alanlarda yaya hızına uygun hız sınırları getirdiği görülmektedir. Bisiklet yolları genel anlamda e-skuter kullanımının serbest olduğu alanlardır ve bisiklet yolunun yokluğunda taşıt yollarının kullanılabilirliği belirtilmiştir. İngiltere, Fransa, Danimarka, Almanya, Malta ve Hollanda dışındaki ülkelerde sigorta gerekliliği bulunmamaktadır ve sürücü belgesi yalnızca Malta ve Hollanda’da talep edilmektedir (Tablo 2).

ABD’de e-skuterlar için özel bir Federal yasa bulunmamaktadır. 1972 Tüketici Ürün Güvenliği Yasası, 2001 yılında revize edilmiş ve e-bisiklet tanımına yer verilmiştir. Bu yasaya göre e-bisikletler “çalıştırılabilir pedallara sahip, maksimum hızı 20 mil/sa ve 750 watt’tan düşük motora sahip olan 2 veya 3 tekerlekli araçlar” olarak sınıflandırılmıştır. Bu yasada yalnızca tanımı bulunmakta olup, kullanım kuralları ile ilgili bilgi verilmemektedir. People for Bikes organizasyonu, bu konu hakkında çalışmalar yapıp 28 eyalette e-bisikletlerle ilgili kuralları yasalaştırmıştır. Ancak e-skuterlar henüz bu aşamaya ulaşmamış, yasal tanımı yapılmamıştır. Başka bir deyişle, ulusal olarak belirlenmiş yasal güvenlik standartlarına sahip değildir [58]. Ocak 2021 itibarı ile bir çok eyalette hız sınırı 20 mil/sa olarak belirlenmiş olsa da 5 eyalet hız sınırını 15 mil/sa olarak sabitlemiştir. Oregon eyaleti hız sınırının en yüksek olduğu eyalettir ve hız limiti 24 mil/sa olarak belirlenmiştir ve bu sebeple de kullanıcıların kask kullanımının zorunlu olduğu tek eyalettir. Yalnızca dört eyalette çocukların kask kullanımı zorunludur. Yedi eyalette sürücülerin en az 16 yaşında olması beklenirken, Utah eyaletinde yaş sınırı 8 olarak belirlenmiştir. On iki eyalette ise yaş sınırı belirlenmemiştir [59].

3.8. Ulaşım türünün gelişimini etkileyen faktörler (Factors affecting the development of this transportation type)

Boston Danışmanlık Grubu tarafından yapılmış bir çalışma, e-skuter kullanımının uzun dönemde ekonomik analizini oluşturmuştur. Bird şirketinin verilerinin kullanıldığı çalışmada şehirlerin nüfus yoğunluğu, şehrin ne kadar bisiklet dostu olduğu, hava durumu ve genç nüfus yoğunluğu parametreleri kullanılarak sistemin etkisi değerlendirilmiştir [26, 60].

Nüfus yoğunluğu, e-skuter gibi mikromobilité türlerine yönelik potansiyel yerel talebi anlamak için iyi bir ölçüt sunmaktadır. Yoğunluk, kullanımlar arası mesafeyi azaltacağından e-skuter talebini arttıracaktır. Yine yoğun araç trafiği ve park yeri yetersizliği e-skuter kullanımını daha cazip hale getirecektir.

Bisiklet altyapısı (bisiklet yolları, bisiklet park yerleri vb.) gelişmiş şehirlerin e-skuter kullanımı ve taleplerini olumlu etkilemektedir [61, 62].

Yapılan tüm çalışmalarda görüldüğü üzere e-skuter’ların en büyük kullanıcı grubu gençler olduğu için, üniversite sayısı fazla ve genç nüfusun yüksek olduğu metropollerde, e-skuter kullanımı için önemli derecede yüksektir. E-skuter’lar sert hava koşulları için pek uygun değildir. Bu nedenle, diğer yönlerden e-skuter’lara uygun olan şehirler bile, aşırı veya uzun süreli yağışlara veya soğuk hava sıcaklığına sahip olduklarında etki dereceleri düşecektir.

E-skuter filosu kurulurken araç sayısı belirlemek, mali etkinlik açısından oldukça önemlidir. Literatürde bazı kentler “skuter cenneti” olarak tanımlanmıştır. Bunlar skuter kullanımında en doygun noktaya ulaşan kentlerdir. Filo sayısı hesaplanırken, bu kentlerde kişi başına düşen skuter sayılarının göz önüne alınarak filo sayısının belirlenmesi, mali açıdan daha verimli olacaktır. Örneğin, “skuter cenneti” olarak tanımlanan Austin, Texas’ta 62,5 kişiye 1 skuter düşmektedir [26]. İlk yatırım açısından, skuter başına düşen kişi sayısının 62,5’tan düşük olması verimsiz olacaktır.

Tablo 2. E-skuter kullanımı ile ilgili bazı Avrupa ülkelerindeki yasal sınırlar (Legal regulations concernin e-scooter use in some European countries)

	Avusturya	Belçika	Bulgaristan	Çekya	Almanya	Danimarka	Finlandiya	Fransa	İtalya	Litvanya	Lüksemburg	Malta	Hollanda	İspanya	İsveç	Türkiye
Yasal tanımı	e-skuter (Elektroroller)	Yer değiştirme araçları	e	İlave motorlu bisiklet f	e-skuter (Elektroroller)	e-skuter	Hafif elektrikli araç	e-skuter (trottinettes électriques)	e-skuter	e-skuter (elektriniai paspirtukai)	Bisiklet	e-skuter (skutters elettrici)	e-skuter (elektrische skuter) e	e-skuter	Bisiklet (elsparkcyklar)	e-skuter
Sürücü Belgesi	X	X	X	X	X	X	X	X	N/A	X	X	✓ ^k	N/A	X	X	X
Sigorta gerekliliği	X	X	X	X	✓	✓	X	✓	N/A	X	X	k	✓	N/A	X	X
Yaş sınırı	16 yaş	X	X	X	14 yaş	15 yaş	X	12 yaş	N/A	N/A	13 yaş (Taşıt yolunda)	16 yaş k	16 yaş	X ^g	N/A	15 yaş
Kask zorunluluğu	12 yaş altı	X	X	18 yaş altı	X	X	X	i	N/A	18 yaş altı	X	X	N/A	16 yaş altı	N/A	X
Maksimum güç	600 W ^b	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1 kW	N/A	500 W	1 kW	0.5 kW	N/A	N/A	N/A	250 W	X
Maksimum hız	25 km/sa ^b	N/A	X	25 km/sa	20 km/sa	20 km/sa	25 km/sa	25 km/sa	20 km/sa	25 km/sa	25 km/sa	N/A	25 km/sa	N/A	20 km/sa	25 km/sa
Taşıt yollarında kullanım	a	N/A	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	≤30 km/sa j	✓	✓	20 km/sa	X	N/A	N/A	Bisiklet şeridi yoksa
Bisiklet yollarında kullanım	✓	>5-6 km/sa d	N/A	✓	✓	✓	N/A	N/A	≤20 km/sa	✓	✓	10 km/sa	✓	N/A	N/A	✓
Yaya yollarında kullanım	X ^c	<5-6 km/sa d	✓	X	X	X	N/A	X	<6 km/sa	3-8 km/sa	X	10 km/sa	X	N/A	yaya hızı	X
Yaya geçidi kullanımı	c	<5-6 km/sa d	✓	X	N/A	N/A	N/A	N/A	<6 km/sa	Taşıt üzerinde yasak	X	10 km/sa	N/A	N/A	yaya hızı	N/A
Parklanma türü	Bisiklet parklanma kurallarına tabi	Bisiklet parklanma kurallarına tabi	X	N/A	Bisiklet parklanma kurallarına tabi	e-skuter parklanma alanı	N/A	Bisiklet parklanma kurallarına tabi	N/A	g	N/A	Yaya kullanım alanları	N/A	N/A	N/A	Yaya/ara ç trafiğini engellem eye-cek şekilde
Toplu taşıma araçlarında taşıma	N/A	✓	✓	N/A	g	✓	N/A	g	N/A	g	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A
a	Bisiklet kullanımına izin verilen taşıt yollarında															
b	Taşıt yollarında kullanım için maksimum değerler															
c	Yaya yollarında kullanım yerel yönetime bırakılmış olmakla birlikte, böyle bir durumda e-skuter hızı yaya hızını geçmez. Bu durum yaya geçidi kullanımı için de geçerlidir.															
d	Kullanıcıyı yaya ya da sürücü olarak tanımlama kriteri hız olarak belirlenmiştir. Bu durum yaya geçidi kullanımı için de geçerlidir.															
e	Yasal düzenleme çalışmaları başlamıştır/güncelleme çalışmaları yapılıyor.															
f	Özel bir yasal tanımı yoktur. Bisiklet kurallarına tabidir ve sürücüleri bisikletli olarak tanımlanmaktadır.															
g	Yerel yönetime bırakılmıştır.															
h	15 km/sa hızın altında kullanımda e-skuter taşıt yönetmeliği altına değerlendirilmeyip, yaya destek aracı olarak değerlendirilmektedir.															
i	Şehir merkezi dışında e-skuter kullanımına hız sınırının 80 km/sa altında olduğu yollarda izin verilmektedir. Bu durumda kullanıcıların, yüksek görünürüklü yelek, kask ve görünür ışık kullanmaları gerekmektedir.															
j	Bu durumda yüksek görünürüklü yelek veya yansıtıcı kullanımı zorunludur.															
k	Taşıt yollarında kullanımda															
*	Kask kullanımı, zorunlu olmayan ülkelerde de önerilmektedir.															
X	Böyle bir kısıtlama yok															
N/A	Bilgiye erişilemedi															

4. Türkiye’de E-Skuter Kullanımı (Use Of E-Scooter In Turkey)

Türkiye’de, kullanıcıların yolculuk süresi boyunca kiraladığı elektrikli skuter kullanımı 2019 senesinde popülerlik kazanmış ve sektöre katılan şirketler ile gelişimini sürdürmeye devam etmektedir. Büyük oranda trafik ve mobilite sorununun çözümüne yönelik olarak tercih edilen bu uygulama, ilk olarak 2019 Mart ayında İstanbul’da hizmet vermeye başlamıştır. 2019 senesinin Aralık ayı sonunda ise Ankara’da e-skuter paylaşımı başlamıştır. Türkiye’de İstanbul, İzmit, Yalova, Bursa, İzmir, Eskişehir, Ankara, Antalya, Gaziantep, Kocaeli, İskenderun, Mersin, Adana ve Konya olmak üzere 14 şehirde E-skuter hizmeti sağlanmaktadır.

E-skuter sisteminin resmi düzenlemesi Türkiye’de 14 Nisan 2021 tarihinde Resmi Gazete’de yayınlanmış “Elektrikli Skuter Yönetmeliği” ile devreye girmiştir. Yönetmelikte elektrikli skuter “Hızı en fazla 25 km/sa ulaşan, tekerlekli, fren mekanizmasına sahip, ayak tahtası ve tutamağı olabilen, dikey bir direksiyon mekanizması içerebilen ve ayakta kullanılan elektrikli taşıt olarak tanımlanmıştır”. E-skuter’ın kullanım yaş sınırı 15 yaş olarak belirlenmiştir. E-skuterların kullanımına ilişkin genel hususlarda belirtildiği şekli ile bu taşıtların; ayrı bir bisiklet yolu varsa taşıt yolunun kullanılmaması, azami hızın 50 km/sa’den yüksek olduğu yerlerde kullanılmaması, ikiden fazla e-skuter’ın bir şeritte yan yana kullanılmaması ve trafik güvenliğini tehlikeye sokacak şekilde kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir. Park edilebilecek ve edilmesi yasak olan yerlere detaylıca değinilmiştir. E-skuter da sürücü harici yolcu alınmayacağı belirtilmiştir.

Ülkemizdeki Ukome kararları ve dünyadaki yönetmelikler incelendiğinde e-skuter için güç sınırı konulduğu görülmektedir. Bu durum Avrupa ülkeleri gibi yükseltisi düşük ülkeler için önemli değilken yüksek yükselti kuşağında bulunan ve engebeli şehir yapılarına sahip Türkiye gibi ülkeler için olumsuz etki yaratmaktadır. Türkiye’de e-skuter üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan literatür taraması sonucunda Türkiye’de yapılmış çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Bölen ve Çeliker [63] tarafından yapılan çalışmada tüketicilerin paylaşımlı e-skuter hizmetlerini benimsemelerinde etkili olan faktörler, “Değer Temelli Benimseme Modeli” ile incelenmiştir. E-skuter hizmetlerini kullanmış olan 110 kişiden toplanan veriler yapısal eşitlik modellemesi tekniğiyle analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda tüketicilerin paylaşımlı e-skuter hizmetlerini kullanışlı ve eğlenceli bir ulaşım aracı olarak gördükleri ancak ücretlerin bu değeri olumsuz etkilediği ortaya konulmuştur. Sarıışık ve Ercoşkun [64] tarafından yapılan çalışmada Türkiye’de hizmet veren dört farklı e-skuter firması ile sözlü ve/veya yazılı olarak iletişime geçilmiştir. Firmalardan alınan teknik ve uygulama bilgileri derlenmiştir. Çalışma sonucunda; Türkiye’de e-skuter firmaları, kullanıcı ve sağlayıcı görüşleri ile ilgili bulgular üzerine kullanıcıların demografik ve sosyo-ekonomik durumları ile ilgili bölgesel çalışmaların yapılması ya da mikrohareketlilik hakkında hiç fikri olmayan sürücülerin mekansal dağılım analizi yapılması önemli olarak görülmüştür.

4. Sonuç Ve Öneriler (Results And Recommendations)

Dünya çapında büyük şehirler, hızlı kentleşmenin etkisiyle, yetersiz toplu taşıma sistemleri, trafik problemleri ve çevresel kirlilik ile yüzleşmektedir. Kent içindeki yolculukların bir bölümü kısa mesafeli/kısa süreli yolculuklardan oluşmaktadır. Mikromobilité, bu yolculuklarda özel araç kullanımının azaltılıp aynı zamanda toplu taşımadaki yükü de azaltarak, özellikle kent içinde yaşayan insanlara yeni bir ulaşım türü olarak ortaya çıkmıştır. İlk olarak bisiklet sistemleri; ile gündeme gelen mikromobilité, bugün elektrikli araçların da yaygın kullanımı ile daha cazip bir alternatif haline gelmiştir. Bu çalışmada dünya genelinde yapılan uygulama ve araştırmalar özetlenmiş ve e-skuter sistemleri; kullanıcı profili, çevresel etkiler, güvenlik tedbirleri ve yasal düzenlemeler kapsamında değerlendirilmiş ve Türkiye’de kullanımı ve denetimi için öneriler sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda e-skuter sistemleri ile ilgili aşağıda sıralanan bulgulara ulaşılmıştır:

- E-skuter kullanımı, şehirden şehire farklılık göstermektedir. Şehrin mevcut tür dağılımı, demografik ve topografik yapısı bu farklılıklarda belirleyici olan en önemli etkenlerdir.
- Dünya literatürü incelendiğinde, e-skuter kullanımı genelde kısa süreli (<11dk) ve kısa mesafeli (~2km) yolculuklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu değerler e-skuterların, kişisel yolculuk mesafe ve süreleri ile uyumlu bir ulaşım türü olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle e-skuter sistemleri, kullanıcıların bu uzaklıktaki yerlere erişiminde kullandıkları araçlar için bir alternatif olarak görülmektedir.
- E-skuterların 16-60 yaş aralığında her yaştan talep görmektedir. Bununla birlikte, kullanım

yüzdesi 21-36 yaş aralığında en yüksek değere ulaşmaktadır.

- E-skuter kullanıcılarının seyahat amaçları şehirden şehre farklılık göstermekle birlikte, genelde iş/egitim yolculukları ve sosyal/eglence yolculukları olarak sınıflandırılmıştır. E-skuterların, haftasonları iş/egitim yolculukları için değil, sosyal aktivite amaçlı kullanıldıkları ve bu sebeple, genelde haftasonları daha uzun süreli ve daha uzun mesafeli yolculuklarda kullanıldıkları tespit edilmiştir.
- E-skuterların ulaşım sisteminde hangi türün yerini aldığı konusunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, ulaşımın bisiklet, yaya ve toplu taşıma odaklı olduğu Avrupa'da, genelde bu türlerden e-skuter kullanımına geçildiği; ulaşımın özel araç odaklı olduğu ABD'de ise, e-skuter kullanımının özel araç kullanımını azalttığı tespit edilmiştir.
- E-skuterların kullanımının arttığı son yıllarda, e-skuter ve e-bisiklet kullanıcılarının karıştığı kaza sayısında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Kazalar ile ilgili yapılmış çalışmalarda, kazaların büyük bölümünün kullanıcı kaynaklı olduğu ve en önemli sebeplerinin hız limiti aşımı, araç yolu ihlali ve trafik kurallarına uyulmaması olduğu belirlenmiştir.
- Ulaşım türlerinin çevreye olan etkisi değerlendirildiğinde; e-skuter sistemi "çevre dostu" olarak görülmektedir. Ancak, e-skuterlar kullanımları sırasında çevresel emisyonları azaltmaya faydalı olsa da, ömürlerinin kısa oluşu ve dağıtım ve toplama sırasında yine özel araçların kullanılıyor oluşu da değerlendirmeye katıldığında neredeyse elektrikli bir araca denk emisyonu sebep olmaktadır. Emisyonların incelendiği çalışmalarda, e-skuterların en büyük emisyon kaynağının malzeme ve imalat olduğu (%50) ve bunu dağıtım ve toplamanın (%43) takip ettiği belirlenmiştir.

Dünya çapında e-skuterlar için belirlenmiş yasal düzenlemeler farklılık göstermekle birlikte, yaş sınırı ve hız limiti çok değişiklik göstermemektedir. Bazı ülkeler e-skuter kullanımı için sigorta gerektirmekte ancak bu ülkeler azınlıkta kalmaktadır. E-skuterların yaya yollarında kullanımına izin verilen ülkeler, bu yollarda ek hız sınırları belirlemişlerdir, bu yollarda yaya hızının geçmeyecek ve yayaları tehlikeye atmayacak şekilde e-skuter kullanımına izin verilmektedir. Bu sonuçlar ve ülkemizdeki mevcut durum göz önüne alındığında, sistemin doğru işlemesi için alınması gereken üst ölçekli tedbirler ve öneriler aşağıda listelenmiştir:

- E-skuterların arada kullanılan değil, sürekli kullanılan bir ulaşım türü haline getirilmesi sistemin verimliliğini arttıracaktır. Bu nedenle sürekli kullanıcılar için ücrette abonelik sistemi indirimi uygulaması getirilmesi tavsiye edilmektedir.
- E-skuter araçlarının uzun ömürlü olacak şekilde üretilmesi, hem işletme maliyetini düşürecek hem de sistemin çevreye olan pozitif etkisinin artmasına katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, filo kurulurken ilk yatırım maliyetinden tasarruf edilmesi önerilmektedir.
- E-skuterların sarj edilmek amacıyla toplanması sırasında oluşan çevresel etkilerin azaltılması adına, skuterlar için uygun sarj istasyonlarının kurulması ve kullanıcıların e-skuterları bu istasyonlara bırakması teşvik edilebilir. Bu sayede, hem skuterlar doğru şartlarda park edildiği için kullanım ömrü uzayacak hem de sarj için toplanma işlemi sırasında çevreye yapılan etki minimize edilmiş olacaktır. Ayrıca sarj istasyonlarına koyulacak güneş panelleri ile sarj maliyeti de düşürülebilir.
- E-skuter ulaşım sistemi ve kullanım kuralları insanlar tarafından henüz yeterince bilinmemektedir. Bu nedenle, öncelikle sistem ve sistemin avantajlarının yazılı ve görsel medya yoluyla kullanıcılara tanıtılması gerekmektedir.
- Yapılan incelemelerde e-skuter ulaşım sisteminde en önemli parametrelerden biri güvenlik olarak karşımıza çıkmaktadır. E-skuterın izin verilen maksimum hız sınırı güvenliği etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Her ne kadar, 14 Nisan 2021 tarihli Resmi Gazete'de yayınlanan "Elektrikli Skuter Yönetmeliği"nde maksimum hız sınırı 25 km/sa olarak belirlenmişse de kentlerin altyapıları incelenerek, bu sınırın bölgesel olarak düzenlenmesi gerekmektedir.
- E-skuter sistemin ilk olarak mevcut ve planlanan bisiklet yollarında hizmete girmesi, sonrasında gerekli altyapı düzenlemeleri yapılarak kent geneline yayılması önerilmektedir.
- Yapılan yasal düzenleme ile e-skuterlar ülkemizde de tanınmış ve kullanım kuralları belirlenmiştir. Öncelikli olarak bisiklet yollarında kullanımına izin verilen sistemin, bisiklet şeridi olmaması durumunda taşıt yollarında kullanılması uygun görülür. Ülkemizdeki bisiklet yolu uzunluğu göz önüne alındığında, e-skuter kullanımının taşıt yolunda yoğunlaşacağı ve ciddi kazaların yaşanmaması için gerekli düzenlemelerin yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Sistemin geliştirilebilmesi için sistemin işleyişi ile ilgili her türlü istatistiki verinin sağlıklı bir şekilde tutulması gerekmektedir. Bu nedenle, sistem sağlayıcının bu veriyi saklayabilecek ve

yönetebilecek bir veri tabanı kurması gerekmektedir.

- E-skuter kullanım bölgelerinin talebe odaklı olarak belirlenebilmesi için yatırımcı ve/veya yerel yönetimler tarafından kullanıcı talep belirleme anketlerinin yapılması yatırım yapılacak bölge/bölgeler seçiminde önemli bir faktördür. Yerel yönetimlerin talep yönetimini değerlendirmesi faydalı olacaktır.
- E-skuterların genç nüfusun yoğun, toplu taşıma bekleme sürelerinin fazla, kısa mesafe ve sürekli yolculukların fazla olduğu bölgelerde daha etkili bir ulaşım alternatifi olacağı öngörülmektedir. Bu anlamda, ülkemizdeki özel araç bağımlılığının azaltılmasında etkili bir rol oynayacağı düşünülmektedir.
- Şehirlerin topografik ve demografik yapısı, kent içi ulaşım türünün türel dağılımı, yolculuk alışkanlıkları, hareketlilik oranları vb. parametreler göz önüne alınarak “mikromobilité öncelik haritasının” oluşturulması ve e-skuter sisteminin bu öncelik sıralaması göz önüne alınarak kentlerimizde hizmete geçirilmesi önerilmektedir.

COVID-19 pandemisi sürecinde kentlerimizde toplu taşıma yolculukları ciddi bir azalma göstermiştir. Toplu taşıma alışkanlığının geri kazanımının uzun yıllar alacağı öngörülmektedir. Bu sebeplerden gelişen teknoloji ile beraber insanları tekrar toplu taşıma alışkanlığı kazandırmak için kısa mesafeli aktarmalı taşımalarda, belirli bölgeler içerisindeki seyahatlerde hem aktarmadaki bekleme sürelerini minimuma indirecek hem de olabildiğince bireysel olarak seyahat edebilecekleri sistemlere ihtiyaç artmaktadır. Bu sebeple gelişmekte olan e-skuter sistemlerine ağırlık verilerek bu türün türel dağılımda pay sahibi bir ulaşım türü haline getirilmesi daha da önem kazanmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Department of Economic and Social Affairs United Nation, “World Urbanization Prospects 2018,” <https://population.un.org>. [Online]. Available: <https://population.un.org/wup>. [Accessed: Sept. 12, 2021].
- [2] J. Jiao and S. Bai, “Understanding the shared e-scooter travels in Austin, TX,” *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 9, no. 2, pp. 135, Feb 2020, doi: 10.3390/ijgi9020135.
- [3] S. E. Bibri and J. Krogstie, “Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 31, pp. 183–212, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.02.016.
- [4] D. Hoornweg, L. Sugar, and C. L. T. Gómez, “Cities and greenhouse gas emissions: moving forward,” *Environ. Urban.*, vol. 23, no. 1, pp. 207–227, 2011, doi: 10.1177/0956247810392270.
- [5] C. Chavez-Baeza and C. Sheinbaum-Pardo, “Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area,” *Energy*, vol. 66, no. 2, pp. 624–634, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.12.047.
- [6] S. Das, “Competitive or Complementary : A Spatiotemporal Investigative Analysis into Austin ’ s Shared Micromobility Modes,” M.S. thesis, The University of Texas at Austin, August 2020.
- [7] C. S. Smith and P. J. Schwieterman, “E-Scooter Scenarios: Evaluating the Potential Mobility Benefits of Shared Dockless Scooters in Chicago,” *Chaddick Inst. Policy Ser.*, no. 1, pp. 6–8, 2018.
- [8] N. Fearnley, E. Johnsson, and S. H. Berge, “Patterns of E-Scooter Use in Combination with Public Transport,” *Findings*, vol. 2019, pp. 1–7, 2020, doi: 10.32866/001c.13707.
- [9] S. O’hern and N. Estgfaeller, “A scientometric review of powered micromobility,” *Sustain.*, vol. 12, no. 22, pp. 1–21, 2020. doi:10.3390/su12229505.
- [10] Z. Zou, H. Younes, S. Erdoğan, and J. Wu, “Exploratory Analysis of Real-Time E-Scooter Trip Data in Washington, D.C.,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2674, no. 8, pp. 285–299, 2020. doi:10.1177/0361198120919760.
- [11] OECD/ITF, “Safe Micromobility,” pp. 98, 2020, [Online]. Available: <https://www.itf-oecd.org/safe-micromobility>. [Accessed: Sept. 21, 2021].
- [12] A. Demeyere, “Techno-economic analysis of micro-mobility providers : derivation of viability conditions,” M.S. thesis, Ghent University, Ghent, 2020.
- [13] S. Shaheen and A. Cohen, “Shared Micromobility Policy Toolkit,” <https://escholarship.org/>, 2019. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/00k897b5>. [Accessed: July. 18, 2021].
- [14] W. Riggs and M. Kawashima, “Exploring Best Practice for Municipal E-Scooter Policy in the United States,” <https://papers.ssrn.com/>, January 12, 2020. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3512725>. [Accessed: July. 18, 2021]
- [15] S. Shaheen, A. Cohen, and I. Zohdy, *Shared Mobility: Current Practices and Guiding Principles*, U.S. Department of Transportation, FHWA-HOP, Washington D.C., 2016.

- [16] G. McKenzie, "Spatiotemporal comparative analysis of scooter-share and bike-share usage patterns in Washington, D.C.," *J. Transp. Geogr.*, vol. 78, no. June 2019, pp. 19–28, 2019. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2019.05.007.
- [17] J. Degele et al., "Identifying E-Scooter Sharing Customer Segments using Clustering," in *IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2018, pp. 1–8.
- [18] S. Gössling, "Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 79, no. January, 102230, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.
- [19] D. Schellong, P. Sadek, C. Schaetzberger, and T. Barrack, "The Promise and Pitfalls of E-Scooter Sharing," *Bost. Consult. Gr.*, pp. 1–14, 2019.
- [20] G. McKenzie, "Spatiotemporal comparative analysis of scooter-share and bike-share usage patterns in Washington, D.C.," *J. Transp. Geogr.*, vol. 78, no. May, pp. 19–28, 2019. doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.05.007.
- [21] H. Younes, Z. Zou, J. Wu, and G. Baiocchi, "Comparing the Temporal Determinants of Dockless Scooter-share and Station-based Bike-share in Washington, D.C.," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 134, no. December 2019, pp. 308–320, 2020. doi:10.1016/j.tra.2020.02.021.
- [22] M. Kostrzewska and B. Macikowski, "Towards Hybrid Urban Mobility: Kick Scooter as a Means of Individual Transport in the City," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 245, no. 5, pp. 052073, 2017. doi:10.1088/1757-899X/245/5/052073
- [23] H. Moreau, L. de J. de Meux, V. Zeller, P. D'Ans, C. Ruwet, and W. M. J. Achten, "Dockless e-scooter: A green solution for mobility? Comparative case study between dockless e-scooters, displaced transport, and personal e-scooters," *Sustain.*, vol. 12, no. 5, pp. 1803, Feb. 2020 doi:10.3390/su12051803
- [24] S. He and K. G. Shin, "Dynamic Flow Distribution Prediction for Urban Dockless E-Scooter Sharing Reconfiguration," in *WWW '20: Proceedings of The Web Conference, Taipei, Taiwan, April 20 - 24, 2020*, pp. 133–143. doi:10.1145/3366423.3380101
- [25] L. J. Mayhew and C. Bergin, "Impact of e-scooter injuries on Emergency Department imaging," *J. Med. Imaging Radiat. Oncol.*, vol. 63, no. 4, pp. 461–466, 2019. doi:10.1111/1754-9485.12889.
- [26] J. Rose, D. Schellong, C. Schaetzberger, and J. Hill, "How E-Scooters Can Win a Place in Urban Transport," *Bost. Consult. Gr.*, pp. 1–10, 2020.
- [27] NACTO (National Association of City Transportation Officials), "Guidelines for Regulating Shared Micromobility," *nacto.org*, September, 2019. [Online]. Available: https://nacto.org/wp-content/uploads/2019/09/NACTO_Shared_Micromobility_Guidelines_Web.pdf. [Accessed: Aug. 21, 2021].
- [28] A. de Bortoli and Z. Christoforou, "Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris," *J. Clean. Prod.*, vol. 273, pp. 122898, 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122898.
- [29] Lime, "More Major European Cities Pass 1 Million E-Scooter Ride Milestone," *li.me*, Sept. 20, 2019. [Online]. Available: <https://www.li.me/second-street/more-major-european-cities-pass-1-million-e-scooter-ride-milestone>. [accessed Sep. 01, 2021].
- [30] G. Dias, E. Arsenio, and P. Ribeiro, "The role of shared e-scooter systems in urban sustainability and resilience during the covid-19 mobility restrictions," *Sustain.*, vol. 13, no. 13, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/su13137084.
- [31] A. Li, P. Zhao, H. He, and K. W. Axhausen, "Understanding the variations of micro-mobility behavior before and during COVID-19 pandemic period," in *Proceedings of the Transportation Research Board 100th Annual Meeting, Virtual Conference, 21–29 January 2021, Washington DC, USA* [Online]. Available: <https://annualmeeting.mytrb.org/OnlineProgramArchive/Browse?ConferenceID=9&searchText=&sort=&sortAscending=True&page=0&pageSize=10&page=10>. [Accessed: 10 Sept. 2021].
- [32] K. Button, H. Frye, and D. Reaves, "Economic regulation and E-scooter networks in the USA," *Res. Transp. Econ.*, vol. 84, no. October, pp. 100973, 2020, doi: 10.1016/j.retrec.2020.100973.
- [33] J. MIN-JI, "Lime's e-scooters arrive in Korea," *Korea Jongang Daily*, Oct. 1, 2019. [Online]. Available: <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/article/article.aspx?aid=3068566>. [Accessed: Sep. 01, 2021].
- [34] PBOT, "2018 E-Scooter Pilot User Survey Results," *portlandoregon.gov*, 2018. [Online]. Available: <https://www.portlandoregon.gov/transportation/article/700916>. [Accessed: Sep. 01, 2021].
- [35] "City of Santa Monica Shared Mobility Device Pilot Program User Survey Results Conducted 01-25-2019 to 02-15-2019," *smgov.net*, 2019. [Online]. Available: https://www.smgov.net/uploadedFiles/Departments/PCD/Transportation/SharedMobility_UserSurveySummary_20190509_FINAL.PDF. [Accessed: Sep. 01, 2021].
- [36] H. Badia and E. Jenelius, "Shared e-scooter micromobility : A review of travel behavior , sustainability , infrastructure , safety and policies Shared e-scooter micromobility ," March, 2021, doi:10.13140/RG.2.2.19225.95841.
- [37] C. Krier, J. Cheretien and N. Louvet, "Uses and Users of Free-floating Electric Scooters in France," *6-t.co*, Jun 27, 2019. [Online]. Available: <https://6-t.co/en/free-floating-escooters-france/>. [Accessed: Sep. 12, 2021].
- [38] M. Ensor, O. Maxwell and O. Bruce, "Mode shift to micromobility", *Waka Kotahi NZ Transport Agency, Research Report 674*, pp.111, 2021.
- [39] SFMTA-San Francisco Metropolitan Transportation Agency, "Powered Scooter Share Mid-Pilot Evaluation," *sfmta.com*, Aug. 28, 2019. [online]. Available: https://www.sfmta.com/sites/default/files/reports-and-documents/2019/08/powered_scooter_share_mid-pilot_evaluation_final.pdf. [Accessed: Sept. 12, 2021]
- [40] D. Uluk et al., "E-scooter: initial knowledge about causes of accidents and injury patterns," *Notfall und Rettungsmedizin*, vol.

23, no. 4, pp. 293–298, 2020, doi: 10.1007/s10049-019-00678-3.

[41] N. Haworth, A. Schramm, and D. Twisk, “Comparing the risky behaviours of shared and private e-scooter and bicycle riders in downtown Brisbane, Australia,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 152, no. December 2020, pp. 105981, 2021. doi:10.1016/j.aap.2021.105981.

[42] M. Siman-Tov, I. Radomislensky, Israel Trauma Group, and K. Peleg, “The casualties from electric bike and motorized scooter road accidents,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 18, no. 3, pp. 318–323, 2017. doi:10.1080/15389588.2016.1246723.

[43] X. Zhang, M. Cui, Y. Gu, L. Stallones, and H. Xiang, “Trends in electric bike-related injury in China, 2004-2010,” *Asia-Pacific J. public Heal.*, vol. 27, no. 2, pp. NP1819-26, Mar. 2015. doi:10.1177/1010539513496840.

[44] H. Kleinertz, D. Ntalos, F. Hennes, J. V. Nüchtern, K. H. Frosch, and D. M. Thiesen, “Accident mechanisms and injury patterns in E-scooter users. A retrospective analysis and comparison with cyclists,” *Dtsch. Arztebl. Int.*, vol. 118, no. 8, pp. 117–121, 2021. doi:10.3238/arztebl.m2021.0019.

[45] J. Yang, Y. Hu, W. Du, B. Powis, J. Ozanne-Smith, Y. Liao, N. Li and M. Wu, “Unsafe riding practice among electric bikers in Suzhou, China: An observational study,” *BMJ Open*, vol. 4, no. 003902, 2014. doi:10.1136/bmjopen-2013-003902.

[46] Austin Public Health and City of Austin, “Dockless Electric Injuries Study,” *austintexas.gov*, Ap. 2019. [Online]. Available: https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Health/Epidemiology/APH_Dockless_Electric_Scooter_Study_5-2-19.pdf. [Accessed: Sept. 12, 2021].

[47] eit Urban Mobility, “Activity Output E-Micromobility Safety Assessment,” *readkong.com*, Dec. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.readkong.com/page/activity-output-e-micromobility-safety-assessment-eit-3512344>. [Accessed: Sept. 21, 2021].

[48] K. Markvica and E. Al, “E-Scooter as Environmentally Friendly Last Mile Option? Insights on Spatial and Infrastructural Implications for Urban Areas based on the Example of Vienna,” in *Real Corp 2020: 25th International Conference on Urban Planning and Regional Development in the Information Society, Aache, Germany, Sept. 15-18, 2020*, pp. 15–18

[49] J. Hollingsworth, B. Copeland, and J. X. Johnson, “Are e-scooters polluters? the environmental impacts of shared dockless electric scooters,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 084031, 2019. doi:10.1088/1748-9326/ab2da8.

[50] M. Masoud, M. Elhenawy, M. H. Almannaa, S. Q. Liu, S. Glaser, and A. Rakotonirainy, “Heuristic Approaches to Solve E-Scooter Assignment Problem,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175093–175105, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2957303.

[51] S. Severengiz, S. Finke, N. Schelte, and N. Wendt, “Life Cycle Assessment on the Mobility Service E-Scooter Sharing,” in *2020 IEEE Eur. Technol. Eng. Manag. Summit, E-TEMS 2020*, pp. 1-6, 2020. doi:10.1109/E-TEMS46250.2020.9111817.

[52] S. Severengiz, N. Schelte, and S. Bracke, “Analysis of the environmental impact of e-scooter sharing services considering product reliability characteristics and durability,” *Procedia CIRP*, vol. 96, pp. 181–188, 2020. doi:10.1016/j.procir.2021.01.072.

[53] M. Ridderstedt and D. Öhman, “Voi har kraftigt överdrivit elsparkcyklars klimatnytta,” *sverigesradio.se*, Oct. 17, 2019. [Online]. Available: <https://sverigesradio.se/artikel/7323721>. [Accessed: 02 Oct. 2021].

[54] Lufthansa Innovation Hub, “The environmental impact of today’s transport types,” *tnmt.com*, May. 11, 2021. [Online]. Available: <https://tnmt.com/infographics/carbon-emissions-by-transport-type/>. [Accessed: 02 Oct. 2021].

[55] Voi Technology, “Sustainability Statement,” *voiscooters.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.voiscooters.com/sustainability/#:~:text=We%20reuse%20spare%20parts%20and,zero%20waste%20target%20by%202022>. [Accessed: 24 Sept. 2021].

[56] D. Carrignon, “Connected and autonomous vehicles, electric scooter and their implications for road network design,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 49, no. 2019, pp. 160–169, 2020. doi:10.1016/j.trpro.2020.09.014.

[57] M. M. Sokołowski, “Renewable and citizen energy communities in the European Union: how (not) to regulate community energy in national laws and policies,” *J. Energy Nat. Resour. Law*, vol. 38, no. 3, pp. 289–304, 2020. doi:10.1080/02646811.2020.1759247.

[58] R. Peace, “eScooter Laws and Regulations In The USA,” *electricbikereport.com*, Feb. 05, 2021. [Online]. Available: <https://electricbikereport.com/electric-scooter-laws-and-regulations/>. [Accessed: 24 Sept. 2021].

[59] D. Shinkle and S. Oren, “Electric Scooters | Laws Balance Public Safety and Micromobility Needs,” *National Conference of State Legislatures, 2020* [Online]. Available: <https://www.ncsl.org/bookstore/state-legislatures-magazine/trends-coronavirus-teen-vaping-e-scooters-and-more.aspx>. [Accessed: 10 Sept. 2021].

[60] J. K. Mathew, M. Liu, and D. M. Bullock, “Impact of Weather on Shared Electric Scooter Utilization,” *2019 IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. ITSC 2019, Auckland, New Zealand [Online], October 27-30, 2019*. IEEE, 2019. pp. 4512–4516, 2019. doi:10.1109/ITSC.2019.8917121.

[61] O. James, J. I. Swiderski, J. Hicks, D. Teoman, and R. Buehler, “Pedestrians and e-scooters: An initial look at e-scooter parking and perceptions by riders and non-riders,” *Sustain.*, vol. 11, no. 20 pp. 5591, 2019. doi:10.3390/su11205591.

[62] R. Ratan et al., “The (digital) medium of mobility is the message: Examining the influence of e-scooter mobile app perceptions on e-scooter use intent,” *Comput. Hum. Behav. Reports*, vol. 3, no. December 2020, pp. 100076, 2021. doi:10.1016/j.chbr.2021.100076.

[63] M.C. bölen and O. Çeliker, “Paylaşımlı Elektrikli Scooter Hizmetlerini Kullanma Niyetinde Etkili Olan Faktörler,” *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Derg.*, vol. 35, no.3, pp. 1101-1123 2021, doi: 10.16951/atauniiib.898594.

[64] B. E. Sarıışık and Ö. Y. Ercoşkun, “Dünyada Ve Türkiye’de Mikro Hareketlilikte E-Scooter Sistemleri E-Scooters in the World and in Turkey as Micro Mobility Devices,” *Eksen Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 2, pp. 72–94, 2021.

Analysis By Taguchi and ANOVA Methods For The Effect Of The Cutting Tool Height Adjustment On Cutting Forces In Turning AISI304 Stainless Steel Material

Ercan DEMİRER^a, Yunus KAYIR^b

Submitted: 03.11.2021 Revised: 23.12.2022 Accepted: 07.02.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.07

ABSTRACT

Keywords: Machinability, Stainless steel, Cutting forces, Tool height setting

^a Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Manufacturing Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5265-7854

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Manufacturing Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6793-7103

*Corresponding author:
ercandemirer06@gmail.com

In this study, the effects of cutting tool height adjustment on cutting force components in turning were investigated. The experiments were carried out on a CNC lathe using AISI304 stainless steel material, which is a reference material. In the experiments, carbide inserts with a SNMG form were used. The cutting tools were tested for three different levels: at the part axis (0 mm), above of the part axis (+0.5 mm), and at below of the part axis (-0.5 mm). Moreover, three different cutting speeds (100, 150 and 225 m/min), three different feeds (0.15, 0.25 and 0.35 mm/rev), three different depths of cut (0.8, 1.3 and 2 mm) and two different insert radius (0.4 and 0.8 mm) were considered into experiments. Cutting force components (F_c , F_f , F_r) were measured instantaneously with a standard dynamometer. Taguchi and ANOVA analysis were done to figure out the effect of the setting of the cutting tool height on the cutting forces. As a result of the evaluation, it is seen that the cutting forces were obtained lower when the cutting tool is adjustment at the part axis and above of the part axis. Otherwise, the cutting forces were measured higher, while the setting the height of cutting tool is at below of the part axis. As the depth of cut and feed rate increased in the experiments, the effect of cutting tool height adjustment on cutting forces also increased. The parameters that are the depth of cut and the feed rate were identified the major effect on the cutting forces.

AISI304 Paslanmaz Çeliğin Tornalamasında Kesici Takım Yükseklik Ayarının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Taguchi ve ANOVA Yöntemiyle Analizi

ÖZ

Bu çalışmada, tornalamada kesici takım yükseklik ayarının kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler CNC torna tezgahında, referans malzeme niteliğindeki AISI304 paslanmaz çelik malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, SNMG formulu karbür uçlar kullanılmıştır. Karbür uçlar, iş parçası ekseninde (0 mm), iş parçası ekseninden yukarıda (+0.5 mm) ve iş parçası ekseninin altında (-0.5 mm) olmak üzere üç farklı seviyede bağlanarak denenmiştir. Uygulamalarda, üç farklı kesme hızı (100, 150 ve 225 m/dak), üç farklı ilerleme (0.15, 0.25 ve 0.35 mm/dev), üç farklı kesme derinliği (0.8, 1.3 ve 2 mm) ve iki farklı kesici uç yarıçapı (0.4 ve 0.8 mm) kesme parametresi olarak alınmıştır. Kesme kuvveti bileşenleri (F_c , F_f , F_r) standart bir dinamometre ile anlık olarak ölçülmüştür. Ölçülen kesme kuvvetleri üzerinde kullanılan deney parametrelerinin etkisinin belirlenmesi için Taguchi ve ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sonucunda, kesici takımın, iş parçası ekseninde ve iş parçası ekseninden yukarıda ayarlanması durumlarında kesme kuvvetleri bileşenlerinde değişim miktarı düşük olurken, aşağıda ayarlanmasının kesme kuvvetleri bileşenlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Deneylerde kesme derinliği ve ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetleri bileşenlerinde kesici takım yükseklik ayarının etkisi artmıştır. Kesme kuvveti bileşenlerinin artışında en büyük etkiye sahip faktörlerin kesme derinliği ve ilerleme miktarı olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler:
İşlenebilirlik, Paslanmaz çelik,
Kesme kuvvetleri, Takım
yükseklik ayarı

1. Giriş (Introduction)

Tornalama işlemlerinde kesici takım ucunun iş parçası ekseninde ayarlanması büyük önem arz etmektedir. İş parçası ekseninde ayarlanmayan bir kesici takımın performansı değişecektir. Universal torna tezgahlarında kesici takım yükseklik ayarı için birçok geleneksel yöntem mevcut olmakla birlikte araştırmacıların geliştirdiği yükseklik ayarlı takım tutucularla da bu sağlanmıştır [1-3]. Bu ayarlama etkin rolü, operatör üstlenmiş ve takım yükseklik ayarı torna tezgahında bulunan gezer punta veya ayna tarafına bağlanan bir sabit punta yardımıyla göz yöntemiyle yapılmıştır. Alın tornalama ile iş parçası ekseninde kalan malzemenin (meme) ölçümüyle de takımın yükseklik ayarı, yaklaşık olarak ayarlanabilmiştir. Ancak bu yöntem küçük yavaşma açısına sahip kesici takımlar için imkansızdır. CNC (Computer Numerical Control) torna tezgahlarında ise durum biraz daha farklı ve kısıtlayıcıdır. CNC torna tezgahında takımların ve/veya takım tutucuların bağlandığı bölüme taret (ATC: Automated Tool Changer) adı verilmektedir. Taretin ve iş parçasının bağlı bulunacağı iş milinin (ayna, pens vb.) ekseninin, tezgahın üretimi sırasında belirlendiği görülmektedir [4]. Zaman içerisinde kullanıma bağlı olarak taret-iş mili ekseninde hatalar oluşmaktadır, bu hatanın giderilmesi zaman kaybına sebep olurken; uzman bir personele ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle bu ihtiyacın takım tezgahı üreticileri tarafından karşılandığı görülmektedir [5]. Aksi takdirde takımın mevcut konumu ancak eksenden aşağıda olduğu durumda, kesici takım altına sentiller beslenerek ayarlanabilmektedir. Kesici takım-iş parçası yükseklik ayarında yalnızca tezgah ve takım tutucu değil kesici takımında etkin rol alacağı göz ardı edilmemelidir.

Yapılan literatür araştırmasında kesici takım yükseklik ayarının etkileri üzerine deneysel çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, talaş kaldırma sırasında pekleşme eğilimi gösteren [6] ve işlenebilirlik testlerinde referans malzeme niteliğindeki AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin CNC torna tezgahında işlenmesinde, kesme parametrelerinin ve kesici takım yükseklik ayarının kesme kuvvetleri bileşenlerine etkisi Taguchi ve ANOVA yöntemiyle incelenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Deney düzeneği ve numuneler (Experimental Setup and Samples)

Deney düzeneği, Nex-106 TAKISAWA marka CNC torna tezgahı üzerine kurulmuştur. Deneylerde kesme kuvveti bileşenlerini ölçmek amacıyla KISTLER type-9272 çok eksenli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre, CNC torna tezgahının üzerinde bulunan taret (ATC: Automated Tool Changer) kısmına, tasarlanarak imalatı yapılan aparatlar ile bağlanmıştır. Kesici takım için dinamometrenin üzerine de bir aparat (takım tutucu) tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 6).

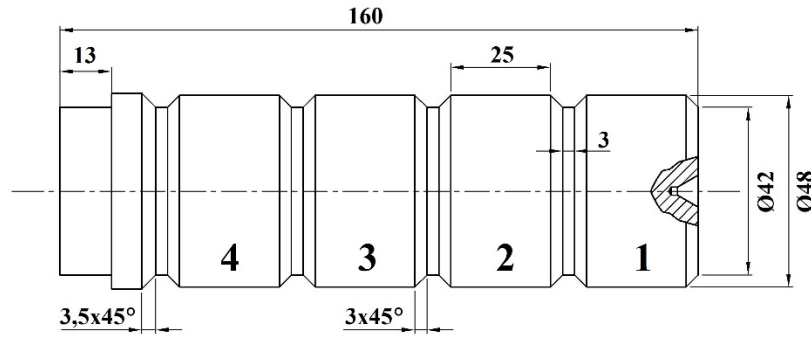


Şekil 1. CNC torna genel görünüm ve taşınabilir ölçüm kolu (CNC lathe overview and portable measuring arm)

Dinamometreyi tarete ve kesici takımı da dinamometreye bağlayan aparatlar, yüksek mukavemet, iyi tokluk ve yüksek titreşim sönümleme özellikleri gösteren küresel grafitli dökme demir malzemesinden imal edilmiştir [7]. Dinamometre ve takım tutucu, kullanılan kesici takımın yaklaşık ± 0.01 mm hassasiyetinde tezgah çalışma eksenine paralel ayarlanmış ve sabitlenmiştir. Sabitlenen takım tutucu tabanı referans alınarak iş mili eksenine ve takım tutucu tabanı arasındaki yükseklik farkı ölçülmüştür. Ölçüm için taşınabilir koordinat ölçüm kolu (Portable Coordinate Measuring Arm) kullanılmıştır (Şekil 1). Ölçümde, iş parçası eksenine bulunmuş ve takım tutucu tabanı düzlemi belirlenmiştir. Kullanılan cihazın noktasal ölçüm hassasiyeti, ölçüm yapılan boyuta bağlı değişkenlik göstermekte olup bu ölçüm için yaklaşık ± 0.018 mm dir [8].

2.2. Deney malzemeleri ve deneyin yapılışı

Yapılan deneysel çalışmada, AISI304 östenitik paslanmaz çelik, iş parçası olarak kullanılmıştır. Piyasadan temin edilen $\varnothing 50$ mm numuneler 160 mm boyunda kesilerek Şekil 2'deki gibi hazırlanmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Deney malzemesinin sertlik değeri 190 HB olarak ölçülmüştür. İş parçasının aynaya bağlanmasından kaynaklanan salgının önüne geçmek için deney öncesinde her parça için 1 mm (çapta; 2 mm) kesme derinliğinde talaş kaldırılmıştır. Böylelikle deney numune çapı $\varnothing 48$ mm ve her bir deney için uzunluğu 25 mm olarak çalışma yapılmıştır. Deney numuneleri ayna-punta arasında sökölmeden her bir numuneden 4 adet deney, kuru işlemeyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Deney parçaları şekil ve ölçüleri (Shape and dimensions of test pieces)

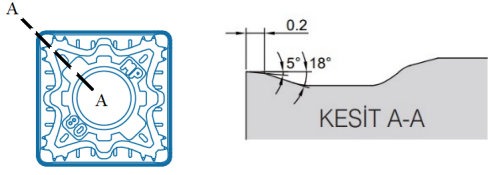
Tablo 1. AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of AISI 304 stainless steel)

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu
0.059	0.375	1.499	0.034	0.006	18.63	0.425	8.84	0.002	1.130

Deneylerde östenitik paslanmaz çelikler için önerilen kesici uç ve bu uca uygun kesici takım (kater) dikkate alınarak 45° yanaşma açısına ve negatif yönlü 7° geriye eğim açısına sahip TSDNN2020K12 kodlu kesici takım (kater) kullanılmıştır. Kodlamadan da anlaşılacağı (2020) gibi takım yüksekliği 20 mm olarak piyasaya sunulmaktadır. Kesici takıma uygun aynı özelliklere sahip iki ayrı uç yarıçapında kesici uçlar (İncelenen deneysel çalışmalar ve tedarikçi firma görüşü alınarak) seçilmiştir (Tablo 2). Seçilen kesici ucun 8 köşesi kullanılabilir. Böylelikle her deney için yeni bir köşe kullanılmış ve kesici uç üzerindeki talaş kaldırmanın etkileri giderilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan M (± 0.13) toleransına sahip kesici uçların her birinin kalınlıkları CMM (Coordinate Measuring Machine) cihazında ölçülmüştür. Ölçülen uçlarda kullanılan 8 köşe (4 köşe üst yüzey ve 4 köşe alt yüzey) için ölçülerin değişmediği ancak kesici uçlar arasında kalınlıklarının 4.75 mm ila 4.77 mm arasında değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Takımın fonksiyonel yüksekliği (HF) ölçülmüş ve ortalama HF yüksekliği 19.998 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Böylelikle kesici takım ve iş parçası konumlandırması yaklaşık ± 0.03 mm hassasiyetinde sağlanmıştır. Kesici takım yüksekliğinin ayarlanması için mikrometreyle ölçüm kontrolü yapılan 1 mm ve 0.5 mm kalınlığında sentiller (hassas altlık) kullanılmıştır.

Tablo 2. Kesici uç özellikleri (Insert specifications)

Kod	Desen	Uç Geometrisi	Kalite	Uç yarıçapı
SNMG 1204... - MP			MT-TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN M25	0.4 0.8



HF: Fonksiyonel yükseklik H: Takım sapı yüksekliği

Şekil 3. Kesici takım kısım ve yükseklikleri [9] (Cutting tool parts and heights)

Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ISO3685 şartları ve kesici takım firmasının önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir ve Tablo 3'te verilmiştir. Bu çalışmada (2x3x3x3) 162 deney yapılması gerekmektedir. Deneylerin güvenilirliği için 2 tekrarlı yapılacağından toplamda 324 deney yapılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Yapılacak deney sayısının oluşturduğu maliyeti azaltmak ve doğru sonuçlara ulaşmak için Taguchi yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 3. Kesme Parametreleri (Cutting Parameters)

Uç Yarıçapı (mm)	0.4	0.8	
Kesme Hızı (m/dak)	100	150	225
İlerleme Miktarı (mm/dev)	0.15	0.25	0.35
Kesme Derinliği (mm)	0.8	1.3	2
Takım Yükseklik Ayarı (mm)	-0.5	0	+0.5

2.3. Kesici takım yükseklik ayarı ve kesme açıları ilişkisi (Cutting Tool Height Adjustment and Cutting Angles Relationship)

Kesici takımın iş parçası eksenine olan yükseklik ayarı, talaş açısı (γ) ve boşluk açısını (α) değiştirecektir. Kesici takım, iş parçası ekseninden yüksekteyken talaş açısı artacak ancak boşluk açısında azalma görünecektir. Kesici takım, iş parçası eksenin altında olduğunda tersi gerçekleşecek ve talaş açısı azalacaktır. Açılarda oluşan değişim, iş parçasının farklı çapları için değişiklik gösterecektir. Talaş kaldırma çapına bağlı değişen açılar kesici takımın yükseklik ayarına göre Şekil 4 ve Eşitlik 1,2,3'teki trigonometrik oranla hesaplanabilir [10].

$$\sin^{-1} \theta = h/r \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \sin^{-1} \theta \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 - \sin^{-1} \theta \quad (3)$$

Burada, θ kesici takımın iş parçası eksenine olan açısını, α_1 eksendeki boşluk açısını, α_2 yeni oluşan boşluk açısını, γ_1 eksendeki talaş açısını ve γ_2 yeni oluşan talaş açısını simgelemektedir. Şekil 4'te h kesici takımın eksenden yüksekliği, r iş parçası yarıçapı, χ yükseklikle oluşan takım düzlemine olan açıdır ve $\chi = \theta$. M kesici takım düzlemidir ve N' kesici takım düzlemine paraleldir.

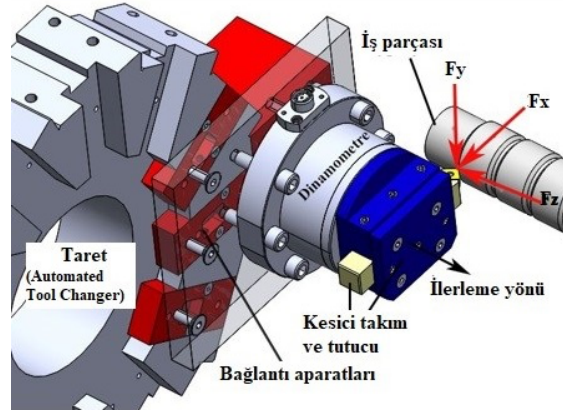
2.4. Kesme kuvvetleri ve ölçümü (Cutting Forces and Measurement)

Deneyler sırasında meydana gelen kesme kuvveti bileşenleri bir dinamometre ile ölçülmüştür. Bu çalışmada, CNC torna tezgahı taretine (ATC: Automated Tool Changer) bağlanan dinamometre ile ölçülen kuvvetlerin (F_x , F_y , F_z) CNC tornada talaş kaldırma işleminde karşılıkları Şekil 7'ye göre aşağıda verilmiştir.

F_x : F_r (Radyal kuvvet)

F_y : F_c (Teğetsel (Esas kesme) kuvvet)

F_z : F_f (İlerleme kuvveti)



Şekil 7. Dinamometre ile ölçülen kesme kuvvetleri ve kesici takım montaj detayı (Cutting forces measured by dynamometer and cutting tool assembly detail)

2.5. Taguchi Yöntemi (Taguchi Method)

Taguchi yöntemi, özellikle talaş kaldırma deneylerinin maliyet ve süresini azaltmak için en uygun kesme parametrelerini belirlemek amacıyla sık kullanılan bir yöntemdir. Literatürde yapılan çalışmalarda, genellikle Taguchi yöntemi ile tasarlanan talaş kaldırma deneylerinde, kullanılan parametrelere (ilerleme miktarı, kesme derinliği, kesici takım formu vb.) bağlı kesme kuvveti bileşenleri, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü gibi deney sonuçlarında en uygun parametrelerin tespiti yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarıyla S/N oranları hesaplanarak ANOVA istatistiksel analizleri gerçekleştirilmiştir [11-15]. Bu çalışmada da bir istatistiksel analiz programı kullanılarak Taguchi modeli oluşturulmuş ve model için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Taguchi modeli için faktörler ve seviyeleri (Factors and levels for the Taguchi model)

Faktör	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
Rd	0.4	0.8	-
V	100	150	225
F	0.15	0.25	0.35
Ap	0.8	1.3	2
H	-0.5	0	+0.5

Rd: Kesici uç yarıçapı (mm) **V:** Kesme hızı (m/dak) **F:** İlerleme miktarı (mm/dev) **Ap:** Kesme derinliği (mm)
H: Kesici takım yükseklik ayarı (mm)

Tablo 5 incelendiğinde Rd faktörü haricinde diğer faktörlerin 3 seviyesi olduğu anlaşılmaktadır. 2 seviyesi bulunan Rd faktörünü de modele dahil etmek için Taguchi karma (mixed) modeli kullanılmıştır. Araştırmalar neticesinde $L_{36}(2^1 3^4)$ modelinin uygun olacağı kararlaştırılmıştır (Tablo 6). Oluşturulan Taguchi modeline göre 36 deney yapılmıştır. Taguchi karma $L_{36}(2^1 3^4)$ deney modeli ve deney sonuçlarında elde edilen kuvvet değerleri Tablo 6' da verilmiştir. Kuvvetler için ayrı ayrı Taguchi analizleri yapılmış ve analizlerde "smaller is better" (en küçük en iyi) yöntemi kullanılmıştır. "Smaller is better" analizi Eşitlik 4'e göre değerlendirilmektedir. Analiz sonucunda ortaya çıkan (S/N) sinyal gürültü oranı ve faktörlerin ortalama etkileri (main effects) değerlerinden grafikler oluşturulmuştur. Faktörlerin etki değerlerini görmek ve yöntemin doğruluğunun tespiti için ANOVA analizleri yapılmıştır.

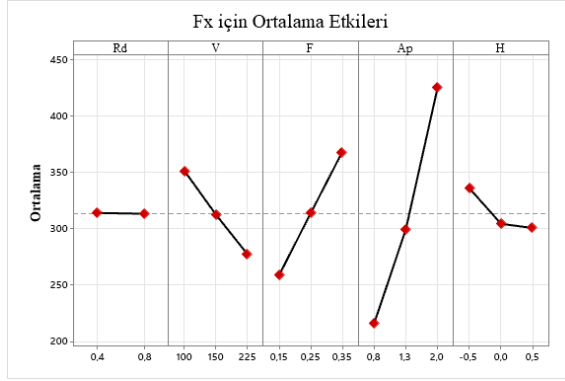
$$n = -\log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \right] \quad (4)$$

Tablo 6. Taguchi L36 deney modeli ve kuvvetler (Taguchi L36 experimental model and forces)

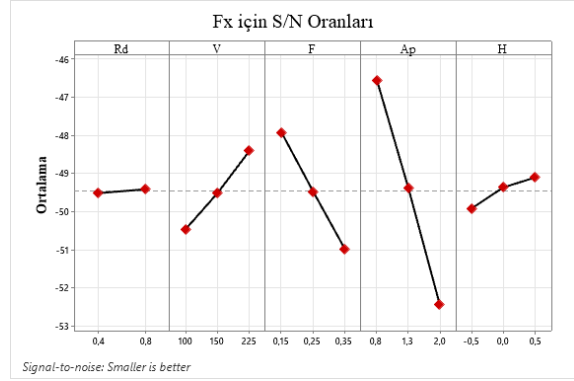
D.No.	Rd mm	V m/dak	F mm/dev	Ap mm	H mm	F _x (F _r) N	F _y (F _c) N	F _z (F _i) N
1	0.4	100	0.15	0.8	-0.5	176	296	147
2	0.4	150	0.25	1.3	0	289	621	214
3	0.4	225	0.35	2	+0.5	470	1234	343
4	0.4	100	0.15	0.8	-0.5	179	294	147
5	0.4	150	0.25	1.3	0	284	617	215
6	0.4	225	0.35	2	+0.5	482	1230	348
7	0.4	100	0.15	1.3	+0.5	263	455	216
8	0.4	150	0.25	2	-0.5	418	978	338
9	0.4	225	0.35	0.8	0	229	499	146
10	0.4	100	0.15	2	0	365	658	321
11	0.4	150	0.25	0.8	+0.5	212	420	146
12	0.4	225	0.35	1.3	-0.5	344	840	232
13	0.4	100	0.25	2	-0.5	487	1015	371
14	0,4	150	0.35	0.8	0	270	575	168
15	0,4	225	0.15	1.3	+0.5	231	408	181
16	0,4	100	0.25	2	0	461	1010	362
17	0,4	150	0.35	0.8	+0.5	262	535	164
18	0,4	225	0.15	1.3	-0.5	227	450	185
19	0,8	100	0.25	0.8	+0.5	220	396	147
20	0,8	150	0.35	1.3	-0.5	362	847	239
21	0,8	225	0.15	2	0	322	646	255
22	0,8	100	0.25	1.3	+0.5	300	605	213
23	0,8	150	0.35	2	-0.5	515	1273	348
24	0,8	225	0.15	0.8	0	153	257	110
25	0,8	100	0.35	1.3	-0.5	394	888	263
26	0,8	150	0.15	2	0	341	643	273
27	0,8	225	0.25	0.8	+0.5	201	390	130
28	0,8	100	0.35	1.3	0	373	833	256
29	0,8	150	0.15	2	+0.5	353	657	278
30	0,8	225	0.25	0.8	-0.5	199	416	128
31	0,8	100	0.35	2	+0.5	544	1250	390
32	0,8	150	0.15	0.8	-0.5	171	290	127
33	0,8	225	0.25	1.3	0	269	609	192
34	0,8	100	0.35	0.8	0	278	540	164
35	0,8	150	0.15	1.3	+0.5	245	436	188
36	0,8	225	0.25	2	-0.5	398	975	297

2.5.1. F_x kuvvetinin değerlendirilmesi ve grafiklerin yorumu (Evaluation of F_x force and interpretation of graphics)

F_x kuvvet değerleriyle Taguchi analizi sonucunda elde edilen faktörlerin ortalama etkileri (main effects) ve S/N oranlarına ait grafikler aşağıda (Şekil 8 ve Şekil 9) verilmiştir.



Şekil 8. Faktörler için F_x ortalamaları
(F_x means for factors)



Şekil 9. F_x için S/N oranlarının etkisi
(Effect of S/N ratios for F_x)

Şekil 8 incelendiğinde F_x kuvveti için en büyük değişime sahip faktörün Ap (0.8, 1.3, 2 mm) olduğu anlaşılmaktadır. Ap faktörünü sırasıyla F, V, H faktörleri izlemektedir. Rd (0.4, 0.8 mm) faktörünün değişiminin çok düşük olduğu gözlemlenmektedir. Benzer bir durum Şekil 9'da verilen S/N oranları grafiği içinde geçerlidir. S/N oranları grafiği incelendiğinde oranlar arasındaki en büyük değişim Ap faktöründe görülmektedir ve Rd faktöründeki değişim en düşüktür. Analiz sonuçlarının daha anlaşılır olabilmesi için Şekil 8 ve Şekil 9'a ait tablolar aşağıda verilmiştir (Tablo 7 ve Tablo 8).

Tablo 7. F_x kuvveti için ortalamalar (Means for F_x force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	313.8	351	258.9	215.5	335.7
2	313.1	312.1	313.6	299.3	304.2
3		277.1	367.8	425.5	300.4
Delta	0.7	73.9	108.9	210	35.3
Rank	5	3	2	1	4

Tablo 8. F_x kuvveti için S/N değerleri (S/N values for F_x force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	-49.5	-50.45	-47.9	-46.52	-49.91
2	-49.4	-49.5	-49.46	-49.37	-49.35
3		-48.39	-50.98	-52.45	-49.08
Delta	0.1	2.05	3.08	5.93	0.82
Rank	5	3	2	1	4

F_x kuvvetinin faktörlere göre değişimini (Delta) veren Tablo 7'de en fazla değişimin (Delta) Ap (fark: 210) faktöründe olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 9'da yer alan S/N oranı değişimi (Delta) incelendiğinde en fazla değişim (Delta) aynı şekilde Ap (fark: 5.93) faktöründe olduğu görülmüştür. Buradan hareketle F_x (radyal kuvvet) kuvveti artışında en etkili parametrenin Ap (kesme derinliği) olduğu görülmüş ve kesme derinliği arttıkça F_x kuvvetinin artış yönünde olacağı anlaşılmıştır. Ap faktöründen sonra seviyeler arasındaki en büyük değişim F (0.15, 0.25, 0.35 mm/dev) faktördür (fark: 108). Tablo 8'de verilen S/N oranları da bu görüşü desteklemektedir. Tablo 7'de diğer faktörlerin değişimleri (Delta) sırasıyla V (fark:73.9), H (fark: 35.3), Rd (fark:0.7) şeklindedir. Analiz sonuçları F_x kuvveti için kesici takım yükseklik ayarının (H) kesici uç yarıçapından (Rd) daha etkili bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Kesici takım ucu, iş parçası ekseninin altında (H: -0.5 mm) olduğu durumda F_x kuvvetinin, eksenin üstünde (H: 0 mm) olduğu duruma göre arttığı (ortalama fark:31.5; S/N fark:0.56) grafiklerden ve tablolardan anlaşılabilmektedir. Eksenin yukarısında (H: +0.5 mm) olduğu durumda, eksenin (H: 0 mm) olduğu duruma göre faktörde oluşan değişim daha düşüktür (ortalama fark:3.8; S/N fark:0.27). F_x kuvveti için yapılan Taguchi analizi sonucunda faktörlerin etki miktarını görmek için ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonucu Tablo 9'da verilmiştir. F_x kuvveti için ANOVA tablosu incelendiğinde

V, F, Ap ve H faktörlerinin anlamlı ($P < 0.05$) olduğu ancak Rd faktörünün istatistiksel olarak anlamlı ($P > 0.05$) olmadığı görülmüştür. Faktörlerin yüzde etkilerine bakıldığında: Ap faktörü 71.67%; F faktörü 23.27%; V faktörü 2.80% ve H faktörü 0.60% olduğu anlaşılmaktadır. Oluşturulan model için belirleme katsayısı R-sq(adj): 97.75% olarak bulunmuştur (Tablo 10). H (kesici takım yükseklik ayarı) faktörünün F_x kuvveti için etkisinin düşük (0.60%) olduğu (Tablo 9) ancak anlamlı olduğu değerlendirilmiştir.

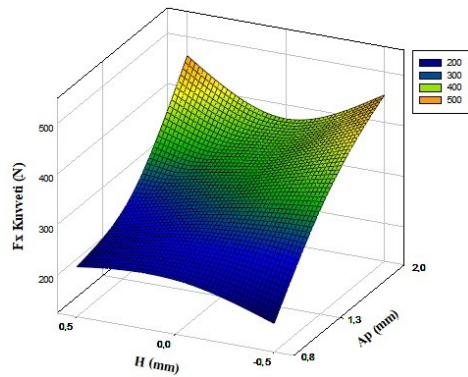
Tablo 9. F_x kuvveti için ANOVA tablosu (ANOVA table for F_x force)

Source	DF	Seq SS	Faktör Etkisi	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Rd	1	3	0.00%	3	3	0.01	0.9140
V	2	11222	2.80%	11222	5611	21.79	0.0000
F	2	93390	23.27%	93390	46695	181.31	0.0000
Ap	2	287644	71.67%	287644	143822	558.44	0.0000
H	2	2396	0.60%	2396	1198	4.65	0.0187
Error	26	6696	1.67%	6696	258		
Total	35	401351	100.00%				

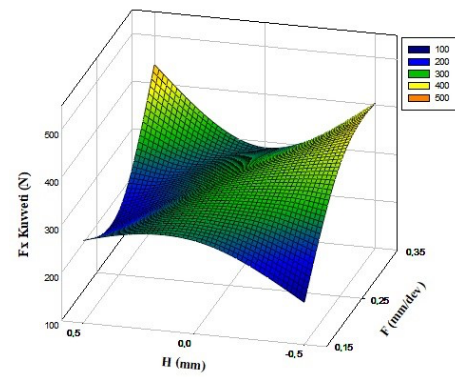
Tablo 10. F_x kuvveti için ANOVA model özeti (ANOVA model summary for F_x force)

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
16.0481	98.33%	97.75%	12837.5	96.80%	323.29	329.71

En büyük etkiye sahip (Tablo 9) Ap ve F faktörlerinin H faktörüyle etkileşimi ve F_x kuvvetine etkileri grafik olarak verilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde kesme derinliği (Ap) arttıkça takım yükseklik ayarının etkisi artmıştır. Yüksek kesme derinliğinde, kesici takımın iş parçası ekseninde bağlanmasıyla F_x kuvvetinde azalma görülmüştür. İlerleme miktarı ve kesici takım yükseklik ayarına göre oluşturulan (Şekil 11) grafik incelendiğinde, düşük ilerleme miktarında kesici takım yükseklik ayarı iş parçası ekseninden yukarıda ve altında olduğu durumlarda F_x kuvvetinde azalma görülmüş ancak ilerleme miktarı arttıkça kesici takımının iş parçası ekseninde olduğu konumda F_x kuvveti azalma eğiliminde olmuştur.



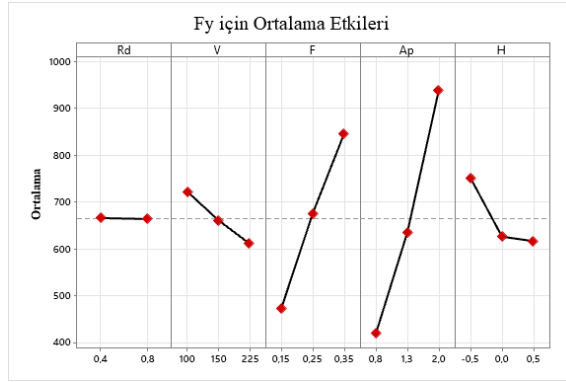
Şekil 10. F_x kuvveti için Ap ve H etkisi
(Interaction of Ap and H for force F_x)



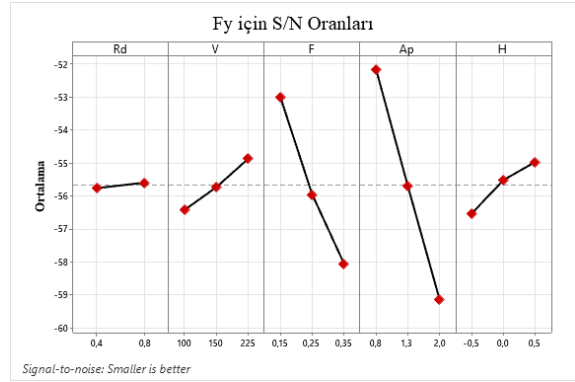
Şekil 11. F_x kuvveti için F ve H etkisi
(Interaction of F and H for force F_x)

2.5.2. F_y kuvvetinin değerlendirilmesi ve grafiklerin yorumu (Evaluation of F_y force and interpretation of graphics)

F_y kuvveti için yapılan Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama etkilerine (main effects) ve S/N oranlarına ait grafikler Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir. Her iki grafik incelendiğinde F_y kuvveti için en büyük değişime (Delta) sahip faktörlerin sırasıyla Ap ve F faktörleri olduğu anlaşılmaktadır. Diğer faktörlerin değişimleri sırasıyla H, V, Rd şeklindedir. Grafiklerin sayısal değerlendirmesi için tablolar (Tablo 11 ve Tablo 12) oluşturulmuştur.



Şekil 12. Faktörler için F_y ortalamaları
(F_y means for factors)



Şekil 13. F_y için S/N oranlarının etkisi
(Effect of S/N ratios for F_y)

Tablo 11. F_y kuvveti için ortalamalar (Means for the F_y force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	665.9	722.2	472.2	419.3	751.5
2	663.9	661.1	675.7	635.3	626.2
3		611.0	846.4	939.7	616.6
Delta	2.0	111.1	374.2	520.4	134.9
Rank	5	4	2	1	3

Tablo 12. F_y kuvveti için S/N değerleri (S/N values for F_y force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	-55.77	-56.43	-53.01	-52.17	-56.54
2	-55.60	-55.73	-55.96	-55.71	-55.52
3		-54.87	-58.06	-59.16	-54.97
Delta	0.17	1.55	5.04	6.99	1.57
Rank	5	4	2	1	3

Tablo 11 incelendiğinde en büyük değişime (Delta) sahip faktör Ap'nin değişiminin (Delta) 520.4 ve onu takip eden F faktörü değişiminin (Delta) 374.2 olduğu anlaşılmaktadır. Diğer faktörler sırasıyla H (fark: 134.9), V (fark: 111.1) ve Rd (fark: 2) şeklindedir. Tablo 12'de yer alan S/N oranları incelendiğinde değişimlerin (Delta) sırasıyla; Ap (fark: 6.99), F (fark: 5.04), H (fark: 1.57), V (fark: 1.55) ve Rd (fark: 0.17) şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Seviyelerin değerlendirilmesi yapıldığında Ap (0.8, 1.3, 2 mm) faktörü seviyelerinde artış oldukça F_y kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir, başka bir deyişle kesme derinliği arttıkça F_y kuvveti artacaktır ve bu durum F (0.15, 0.25, 0.35 mm/dev) faktörü seviyeleri içinde açık olarak görünmektedir. H (-0.5, 0, +0.5 mm) faktörü seviyeleri incelendiğinde seviye 1 (H: -0.5) mm için F_y kuvvetinde artış gözlemlenmiştir. Tablo 4 incelendiğinde birinci eğim açısının (a) ve üçüncü eğim açısının (c) arttığı, buna bağlı olarak ikinci eğim açısının (b) azaldığı görülmüştür. Bu açı değişiminin talaş temas uzunluğunu arttırdığı düşünülmüştür. F_y kuvvetinde ki artışın, talaş açısının (γ) negatif yönde değişmesi ve buna bağlı olarak talaş temas uzunluğundaki büyümeden kaynaklandığına atfedilmiştir. Bu görüş, literatüre uygundur [16-19]. H faktörü seviyeleri 2 (0 mm) ve 3 (+0.5 mm) arasındaki değişimin daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, kesici ucun ikinci eğim açısının (b) artması (Tablo 4) ve buna bağlı olarak boşluk açısının (α) azalmasıyla izah edilmiştir. F_y kuvveti için yapılan ANOVA analiz sonucuna ait değerler Tablo 13'te verilmiştir.

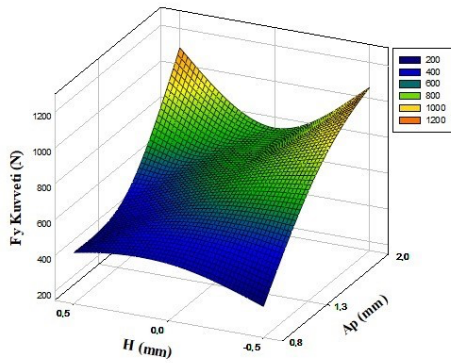
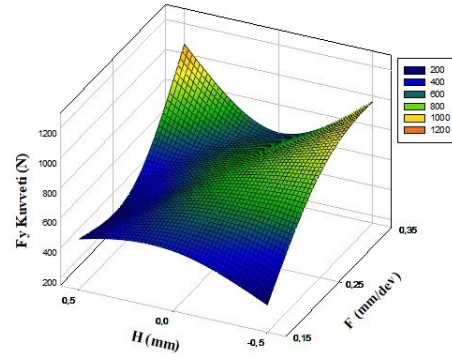
Tablo 13. F_y kuvveti için ANOVA tablosu (ANOVA table for F_y force)

Source	DF	Seq SS	Faktör Etkisi	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Rd	1	935	0.03%	935	935	0.29	0.5941
V	2	5737	0.19%	5737	2868	0.89	0.4216
F	2	1064254	34.65%	1064254	532127	165.65	0.0000
Ap	2	1870790	60.90%	1870790	935395	291.19	0.0000
H	2	46419	1.51%	46419	23210	7.23	0.0032
Error	26	83520	2.72%	83520	3212		
Total	35	3071656	100.00%				

Tablo 14. F_y kuvveti için ANOVA model özeti (ANOVA model summary for F_y force)

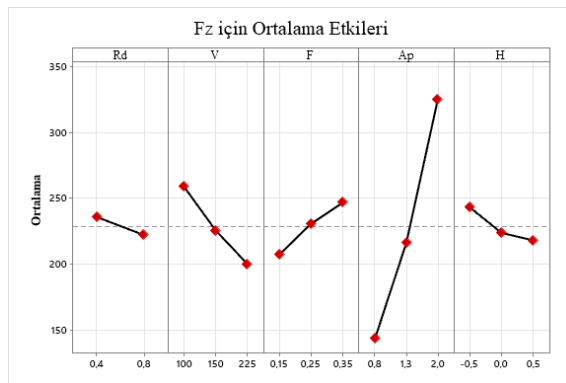
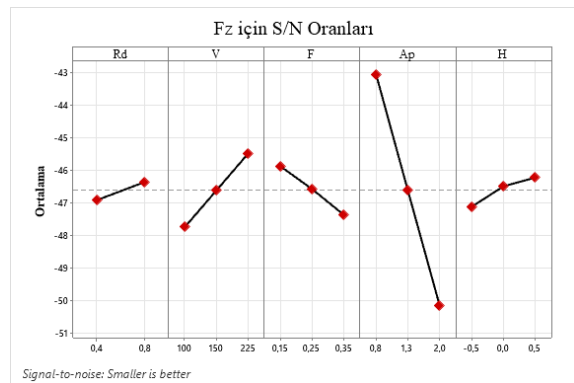
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
56.6773	97.28%	96.34%	160122	94.79%	414.14	420.56

Tablo 13 incelendiğinde Ap, F, H faktörlerinin istatistiksel olarak anlamlı ($P < 0.05$) olduğu ancak V ve Rd faktörlerinin anlamlı ($P > 0.05$) olmadığı anlaşılmıştır. Faktör etkileri sırasıyla; Ap (60.90%), F (34.65%), H (1.51%), V (0.19%) ve Rd (0.03%) şeklinde oluşmuştur. Oluşturulan model için belirleme katsayısı R-sq(adj): 96.34% olarak bulunmuştur (Tablo 14). En büyük etkiye sahip (Tablo 13) Ap ve F faktörlerinin H faktörüyle etkileşimi ve F_y kuvveti etkileri grafik olarak verilmiştir (Şekil 14, Şekil 15). Şekil 14 incelendiğinde kesme derinliği (Ap) arttıkça takım yükseklik ayarının etkisi artmıştır. Yüksek kesme derinliğinde, kesici takımın iş parçası ekseninde bağlanması durumunda F_y kuvvetinde azalma görülmüştür. Şekil 15 incelendiğinde, düşük ilerleme miktarlarında kesici takımın yükseklik ayarının F_y kuvvetinde büyük bir etkisi olmamış ancak ilerleme miktarı arttıkça kesici takımının iş parçası ekseninde olduğu konumda F_y kuvveti azalma eğiliminde olmuştur.

Şekil 14. F_y kuvveti için Ap ve H etkisi
(Interaction of Ap and H for force F_y)Şekil 15. F_y kuvveti için F ve H etkisi
(Interaction of F and H for force F_y)

2.5.3. F_z kuvvetinin değerlendirilmesi ve grafiklerin yorumu

F_z kuvveti için Taguchi analizi sonucunda elde edilen faktörlerin ortalama etkilerine (main effects) ve S/N oranlarına ait grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 16 ve Şekil 17). Analiz sonucunun grafiklerle birlikte değerlendirilmesi için sayısal değerleri Tablo 15 (main effects) ve Tablo 16'da (S/N oranları) verilmiştir.

Şekil 16. Faktörler için F_z ortalamaları
(F_z means for factors)Şekil 17. F_z için S/N oranlarının etkisi
(Effect of S/N ratios for F_z)Tablo 15. F_z kuvveti için ortalamalar (Averages for F_z force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	235.8	259.0	207.3	143.3	243.2
2	222.1	225.8	230.7	216.3	223.8
3		200.1	246.9	325.3	218.0
Delta	13.7	58.9	39.5	182.0	25.2
Rank	5	2	3	1	4

Tablo 16. F_z kuvveti için S/N değerleri (S/N values for F_z force)

Level	Rd	V	F	Ap	H
1	-46.92	-47.75	-45.89	-43.06	-47.13
2	-46.37	-46.62	-46.59	-46.63	-46.50
3		-45.49	-47.39	-50.17	-46.23
Delta	0.56	2.26	1.50	7.11	0.90
Rank	5	2	3	1	4

Grafikler (Şekil 15 ve Şekil 16) ve tablolar (Tablo 15 ve Tablo 16) incelendiğinde F_z kuvveti için en önemli parametrenin en büyük değişikliğe (Delta) sahip Ap faktörü olduğu anlaşılmıştır. Ap (0.8, 1.3, 2 mm) faktörü seviyeleri için kesme derinliğinin artmasıyla F_z (ilerleme kuvveti) kuvvetinin artış yönünde olduğu belirlenmiştir. Faktörlerin ortalama etkileri (Tablo 15) incelendiğinde, Ap (fark:182) faktöründen sonra değişim (Delta) büyüklükleri sırasıyla; V (fark:58.9), F (fark:39.5), H (fark:25.2) ve Rd (fark:13.7) şeklinde olmuştur. Tablo 16'da verilen S/N oranlarına ait değişim değerleri sırasıyla Ap (fark:7.11), V (fark:2.26), F (fark:1.5), H (fark:0.9) ve Rd (fark:0.56) şeklinde olmuştur.

F_z kuvveti için ANOVA tablosu (Tablo 17) incelendiğinde en büyük etkiye sahip faktörün Ap (kesme derinliği) olduğu anlaşılmıştır (etki: 86.74%). Bunu sırasıyla F (etki: 7.09%), V (etki: 3.69%), Rd (etki: 0.71%) ve H (0.38%) izlemiştir. Tablo 17 de yer alan tüm faktörlerin F_z kuvveti için anlamlı olduğu görülmüştür (P<0.05). Oluşturulan model için belirleme katsayısı R-sq(adj): 98.13% olarak bulunmuştur (Tablo 18).

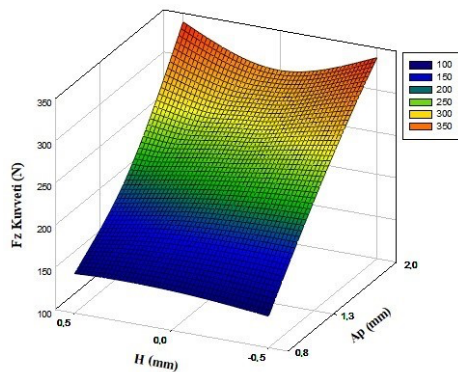
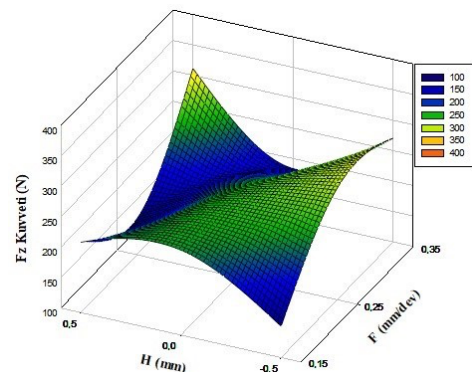
En büyük etkiye sahip (Tablo 17) Ap ve F faktörlerinin H faktörüyle etkileşimi ve F_z kuvveti etkileri grafik olarak verilmiştir (Şekil 18, Şekil 19). Şekil 18 incelendiğinde kesme derinliği (Ap) arttıkça takım yükseklik ayarının etkisi artmıştır. Yüksek kesme derinliğinde, kesici takımın iş parçası ekseninde bağlanmasıyla F_z kuvvetinde azalma görülmüştür. İlerleme miktarı ve kesici takım yükseklik ayarı etkisini gösteren grafik (Şekil 19) incelendiğinde, düşük ilerleme miktarında kesici takım iş parçası ekseninden yukarıda ve altında bağlandığında F_z kuvvetinde azalma görülmüş ancak ilerleme miktarı arttıkça kesici takımının eksende olduğu konumda F_z kuvveti azalma eğiliminde olmuştur.

Tablo 17. F_z kuvveti için ANOVA tablosu (ANOVA table for F_z force)

Source	DF	Seq SS	Faktör Etkisi	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Rd	1	1681	0.71%	1681	1681	13.30	0.0012
V	2	8700	3.69%	8700	4350	34.41	0.0000
F	2	16726	7.09%	16726	8363	66.15	0.0000
Ap	2	204704	86.74%	204704	102352	809.66	0.0000
H	2	890	0.38%	890	445	3.52	0.0443
Error	26	3287	1.39%	3287	126		
Total	35	235987	100.00%				

Tablo 18. F_z kuvveti için ANOVA model özeti (ANOVA model summary for F_z force)

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
11.2434	98.61%	98.13%	6301.22	97.33%	297.67	304.09

Şekil 18. F_z kuvveti için Ap ve H etkisi (Interaction of Ap and H for force F_z)Şekil 19. F_z kuvveti için F ve H etkisi (Interaction of F and H for force F_z)

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, kesici takım yükseklik ayarının ve kesme parametrelerinin, AISI304 östenitik paslanmaz çeliğin tormalamasında kesme kuvvetleri bileşenlerine etkisi gözlemlenmiş, Taguchi yöntemi ve ANOVA ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Kesici takım yükseklik ayarının iş parçası ekseninin altında (H:-0.5 mm) olduğu durum için kuvvetlerin artış yönünde olduğu görülmüştür. Kuvvetlerdeki bu artış kesici takımdaki talaş açısının azalmasından kaynaklandığına atfedilmiştir. Kuvvetlerdeki artış, kesici takım-talaş temas uzunluğunun artmasıyla açıklanmıştır. Kesici takımın iş parçası ekseninde ve yukarısında olduğu durumlar arasındaki kuvvet değişimi farkının çok düşük olduğu değerlendirilmiştir. Bu sonucun talaş açısının artmasıyla birlikte boşluk açısındaki (α) azalmadan kaynaklandığına atfedilmiştir [20-23].

Kesme kuvvetlerinde en etkili faktörün Ap (kesme derinliği) olduğu görülmüştür. Kesme derinliğinin artması ile tüm kesme kuvveti bileşenlerinin arttığı ve ANOVA sonucunda bu etkinin F_x kuvveti için 71.67%, F_y kuvveti için 60.90% ve F_z kuvveti için 86.74% olduğu belirlenmiştir. Ap (kesme derinliği) faktörünün kuvvetlere olan etkisi incelendiğinde ilerleme kuvveti (F_z) üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. ANOVA sonucuna göre Ap faktöründen sonra etkili faktörün F (ilerleme miktarı) faktörü olduğu belirlenmiştir. F faktörünün etkisi; F_x kuvveti için 23.27%, F_y kuvveti için 34.65% ve F_z kuvveti için 7.09% olduğu anlaşılmıştır. F faktörü en büyük etkiyi F_y (teğetsel (esas kesme) kuvvet) kuvveti üzerinde göstermiştir. İlerleme miktarının artmasıyla talaş kaldırma kuvvetinin tüm bileşenlerinde (F_c , F_f , F_r) artış gözlemlenmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvveti bileşenlerinin artacağı sonucuna varılmıştır. Kaldırılan talaş hacmi nedeniyle bu beklenen bir durumdur [24-27].

V (kesme hızı) faktörü incelendiğinde kesme hızının artışıyla kuvvetlerde azalma meydana gelmiştir. Kesme hızının artmasıyla oluşan kuvvetlerdeki azalma, kesici kenarda oluşan yığıntı talaşın (BUE) azalmasına atfedilmiştir. Kesme hızının artmasıyla, belirli bir düzeye kadar artan sıcaklığın etkisiyle, iş parçasının kopma direncinin azalması da kuvvetlerin düşmesine olanak sağlamıştır. Paslanmaz çeliğin işlenmesinde belirli bir düzeye kadar arttırılan kesme hızının kuvvetleri düşüreceği anlaşılmıştır [28,29].

Rd (uç yarıçapı) faktörü etkisinin, F_x ve F_y kuvvetlerinde istatistiksel bir etkiye ($P>0.05$) sahip olmadığı belirlenmiştir. Bu düşük etkinin küçük yavaşma açısına sahip kesici takımda, kuvvetlerin kesici kenar boyunca dengeli dağılımından kaynaklanmasına atfedilmiştir [30]. Rd faktörünün F_z (ilerleme kuvveti) kuvveti üzerinde 0.71% etkiye sahip ve anlamlı ($P<0.05$) olduğu Tablo 17'den anlaşılmaktadır. Kesici uç yarıçapının küçülmesiyle ilerleme kuvvetinin arttığı (Şekil 16) görülmüştür. Bu artış küçük uç yarıçapına sahip kesici takımdaki hızlı aşınma ve "kuvvetlerin azalması, büyük uç yarıçapına sahip kesicinin kesme kenarı ve iş parçası arasındaki temas yüzeyine etki eden düşük kuvvetten kaynaklanır" fenomeniyle açıklanmıştır [12, 26, 31].

Taguchi ve ANOVA tabloları incelendiğinde, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde etki eden kuvvet bileşenlerinin azaltılması için küçük yavaşma açılı (45°) kesici takımlarda, kesici uç yarıçapı büyük seçilmeli (Rd:0.8 mm), kesme hızı arttırılmalı (V:225 m/dak) ve kesme derinliği azaltılmalıdır (Ap:0.8 mm). Analiz sonuçlarına bağlı olarak, ilerleme miktarı düşük seviyelerde tutulmalıdır (F :0.15 mm/dev) ve kesici takım yükseklik ayarı iş parçası ekseninde (H:0 mm) veya yukarısında (H:+0.5 mm) olmalıdır. Kesici takım yükseklik ayarının etkisinin değerlendirilmesinde, talaş kaldırılan iş parçasının geometrik özellikleri ve yüzey deformasyonları da (dairesellik, silindiriklik, sertlik vb.) incelenmelidir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları: Tormalama*. İstanbul: Birsan Yayınevi, 2000, pp. 91-93.
- [2] T. Ma, "A Height Adjustable Tool Holder," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 496, no. 500, pp. 873-876, 2014.

doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.873

[3] S. Lata and Hitesh, "A Design Insight for Substitution of Metal Shims with Reverse Engineered Element in Tool Post for Alignment of Tool-Work Center," *European Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 114-129, 2020. doi:10.33422/ejest.v3i1.248

[4] G. E. Thyer, *Construction of machine tools: Computer Numerical Control of Machine Tools*, Second edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991, pp. 37-90.

[5] M. Mori and M. Fujishima, "Sustainable Service System for Machine Tools," in *2nd Int. Through-life Engineering Services Conf on Engineering Services, CIRP 11 2013, Nagoya, Japan, December 2013. A. Tiwari, 2013*. Amsterdam: Elsevier, 2013. pp. 8-14.

[6] M. A. Xavier, "Evaluating the machinability of AISI 304 stainless steel using alumina inserts" *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 55, no. 2, pp. 7, 2012.

[7] S. Karaman, "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (GGG40, GGG50, GGG60, GGG70) Üretim Sürecinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üni. Edirne, Türkiye, 2011.

[8] FARO Knowledge Base, "Technical Specification," *knowledge.faro.com*, 2016. [Online]. Available: <http://web.archive.org/web/20220221165714/https://downloads.faro.com/index.php/s/N95m3Hi8LZQw4FP>. [Accessed: Aug. 10, 2021].

[9] Akko, "Kesici Takım Kataloğu," *akko.com.tr*, Jan. 01, 2021. [Online]. Available: https://www.akko.com.tr/download_dosya/akko-cutting-tools-2021-products-catalogue.pdf. [Accessed: Mar. 10, 2021].

[10] D. R. Jana and T. Mandal, "Mathematical Calculation of Effects on Tool Setting on Tool Cutting Angle" in *Proc. of the Int. MultiConf. of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2008, Hong Kong, China*, [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu>. [Accessed: 10 Jul. 2020].

[11] Y. Kayır, S. Aslan ve A. Aytürk, "AISI 316Ti Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Kesici Uç Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 28, no. 2, pp. 363-372, 2013.

[12] M. Günay, "AISI 316L Çeliğinin İşlenmesinde Takım Radyüsü Ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu," *Gazi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 28, no. 3, pp. 437-444, 2013.

[13] G. Meral, M. Sarıkaya ve H. Dilipak, "Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 27, no. 4, pp. 332-338, 2011.

[14] Saurabh, J. S. Jassi, A. Mohammad, D. P. Singh and H. Z. Jafri, "Machining Parameter Optimization Using Taguchi Approach" in *1st Int. Conf. on Futuristic trend in Computational Analysis and Knowledge Management, ABLAZE 2015, Haryana, India*, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: Jul. 12, 2020].

[15] M. Yurdakul, S. Güneş and Y. T. İç, "Honlama Prosesinde Yüzey Kalitesinin Taguchi Metodu İle İyileştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 31, no. 2, pp. 347-360, Jun. 2016. doi:10.17341/gummd.40509

[16] U. Şeker, "Kesici Takım Tasarımı Ders Notları," Ankara: Gazi Üniversitesi, 2008.

[17] Y. Altıntaş, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. New York: Cambridge University Press, 2012.

[18] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press, 2005.

[19] A. Duran ve A. Acır, "HSS Torna Kalemındaki Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisi," *Journal of Polytechnic*, vol. 7, no. 3, pp. 211-215, 2004.

[20] M. Günay, E. Aslan, İ. Korkut ve U. Şeker, "Investigation of the Effect of Rake Angle on Main Cutting Force," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, no. 9, pp. 953-959, 2004. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.01.015

[21] M. Sekmen, "Talaş Açısının Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmeler Üzerindeki Etkilerinin Simülasyonu Ve Deneyisel Olarak Doğrulanması," Doktora Tezi, Gazi Üni., Ankara, Türkiye, 2013.

[22] E. G. Thomsen, A. G. MacDonald and S. Kobayashi, "Flank Friction Studies With Carbide Tools Reveal Sublayer Plastic Flow," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 84, no. 1, pp. 53-62, 1962. doi:10.1115/1.3667438

[23] S. Kobayashi and E. G. Thomsen, "The Role of Friction in Metal Cutting," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 82, no. 4, pp. 324-332, 1960. doi:10.1115/1.3664240

[24] N. Altan Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin ve O. Özbek, "AISI 304 ve AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi," *Journal of Polytechnic*, vol. 20, no. 1, pp. 43-49, 2017. doi:10.31202/ecjse.67151

[25] G. Basmacı, "AISI 316 Ti Paslanmaz Çeliklerin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu," *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 7, no. 1, pp. 6-3, 2018. doi:10.21541/apjes.422606

[26] Y. Kayır ve A. Aytürk, "Investigation of Machinability Characteristics of AISI 316Ti Stainless Steel," *Pamukkale Üniversitesi*

Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 18, no. 1, pp. 61-71, 2012. doi:10.5505/pajes.2012.58076

[27] Ö. Tekaslan, N. Gerger, M. Günay ve U. Şeker, "AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Titanyum Karbür Kaplamalı Kesici Takım İle Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 135-144, 2007.

[28] İ. Korkut, M. Kasap, İ. Çiftçi ve U. Şeker, "Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel," *Materials and Design*, vol. 25, no. 4, pp. 303-305, 2004. doi:10.1016/j.matdes.2003.10.011

[29] F. Memiş ve Y. Turgut, "AISI 2205 Dupleks Paslanmaz Çeliğin CNC Torna Tezgahında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Araştırılması," *Manufacturing Technologies and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 22-33, 2020.

[30] J. Hwang, E. HyounJeong, E.-S. Chung and S. Y. Liang, "Assessment of the Cutting Tool ing Effect on Turning Chatter," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 433, no. 435, pp. 2101-2106, 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.433-435.2101

[31] W. Chen, "Cutting Forces and Surface Finish When Machining Medium Hardness Steel Using CBN Tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 3, pp. 455-466, 2000. doi:10.1016/S0890-6955(99)00011-5

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Experimental Investigation of Dry Environment Abrasive Wear Behavior of a Plain Bearing Material

Recep Demirsöz^{*a}

Submitted: 29.11.2021 Revised : 09.03.2022 Accepted: 09.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.08

ABSTRACT

Keywords: Abrasive wear, dry sliding, bearing material, ANOVA

^a Karabuk University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0674-4572

^{*}Corresponding author:
recepdemirsoz@karabuk.edu.tr

In this study, using variables such as load and sliding speed, which are effective parameters on abrasive wear, the amount of wear on the bearing material, friction coefficients, and trace depth values according to the experimental conditions were determined. According to the results of the analysis of variance performed as a result of the experiments carried out in the ball-on-flat experimental setup, the most effective parameter for all outputs was the load value, and the effect ratio for mass loss was 66.26%, the effect ratio for the friction coefficient was 53.02% and the effect ratio for the trace depth was 85.69%. The R^2 values obtained from the comparison of the experimental results with the regression results were found to be 0.9750, 0.9988, and 0.9759 for mass loss, friction coefficient, and trace depth, respectively. These results show that the regression model fit is good.

Bir Kaymalı Yatak Malzemesinin Kuru Ortam Abrasif Aşınma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, abrazif aşınma konusunda etkili parametreler olan yük ve kayma hızı gibi değişkenler kullanılarak yatak malzemesinde meydana gelen aşınma miktarları, deney şartlarına göre sürtünme katsayıları ve iz derinliği değerleri belirlenmiştir. Ball-on-flat deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda yapılan varyans analizi sonuçlarına göre tüm çıktılar için en etkili parametre yük değeri olup kütle kaybı için etki oranı %66.26, sürtünme katsayısı için etki oranı %53.02 ve iz derinliği için etki oranı ise %85.69 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçların regresyon sonuçları ile mukayesesinden elde edilen R^2 değerleri ise kütle kaybı, sürtünme katsayısı ve iz derinliği için sırası ile 0.9750, 0.9988 ve 0.9759 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar regresyon model uyumunun iyi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Abrasif aşınma, kuru sürtünme, yatak malzemesi, ANOVA metodu

1. Introduction

The reason for many damages encountered in the industry is that the equipment is left without oil due to malfunctions of the lubrication systems. Lubrication is an indispensable requirement for almost all mechanical equipment. It is important that the amount of oil required by the rolling and sliding bearings used in the bearing of the rotating equipment is sent regularly and in sufficient quantities. Most of the time, this equipment can be left without oil for various reasons and therefore can be damaged in a short time. Since the roller bearings move according to the rolling method, they can tolerate this oil-free situation for a certain period. However, if the plain bearings are left without oil, that is, either no oil film is formed or the existing oil film is torn, metal-to-metal friction occurs.

In many previous studies, different wear environments were studied. There are studies on the environments, which are expressed as colloidal environments and contain particles in nanometer size that cannot be seen with the naked eye [1,2]. In their studies, Çetin and Korkmaz conducted experiments in a ball-on-flat experimental setup in a total of six different environments: dry environment, water environment, ethylene glycol and a medium containing three different nano-silver ratios of 4%-8% and 12%, respectively [3]. two different speeds and two different load values were chosen in the experiments. According to the results, it was concluded that with the increase in the number of nano-silver particles, a 33.99% reduction in mass loss, an improvement of 21.13% in surface quality, an 18.16% decrease in friction coefficient and a 74.31% decrease in ambient temperature were achieved. Leon et al. boronized AISI 316L stainless steel material was subjected to dry friction test in a ball-on-flat experimental setup [4]. They selected load, distance, sliding speed and distance as variables. As a result of the experiments, they got the results of wear rate, scar depth and friction coefficient as output. They carried out their experiments according to ASTM G133-05 standard procedures and on the UMT-2 universal test setup. As a result of the statistical analyses they performed on the results, it was revealed that the load variable had an effect of 63.7%, 59.60% and 62.67% on the wear rate, scar depth and friction coefficient, respectively. Sudhakar et al. In their study, they studied the effects of alloying elements on the dry friction performance of high chromium white cast iron and Ni-hard iron materials [5]. Vanadium, titanium and boron elements were used for high chromium white cast iron material as alloying element. The wear tests were carried out on a pin-on disc test setup at 159 rpm, 319 rpm and 478 rpm, and at 10-20 and 30 N load values. They concluded that the highest wear rate was reached when the medium speed of 319 rpm and the highest load value of 30 N were applied. It was observed that the wear rate decreased as the sliding speed increased from 159 rpm to 478 rpm at a lower load value of 10 N. In this case it was mainly due to the lubricity of the matrix. It was observed that the friction coefficient decreased with the increase of the rotational speed. For all alloys, it was determined that it was the highest at 159 rpm and the lowest at 478 rpm.

In their study, Elleuch et al. carried out dry friction wear tests on a pin-on-disc experimental setup using CW614 bronze material [6]. They used 52100 steel as an abrasive. They used 20, 40 and 80 N load and 1, 4 and 7 m/s velocity values as variables. They chose 3500m as the friction distance. They evaluated the chemical composition, surface morphology and microstructure of the worn surface by performing SEM (Scanning Electron Microscope) imaging and EDX (Energy Dispersive X-Ray) measurements on the wear surfaces. They concluded that the coefficient of friction in dry friction directly affects the temperature increase in the contact zone.

In their study, Mindivan et al. used a synchronizer ring made of high strength ($\alpha+\beta$) bronze material. [7] They studied the wear behavior of this material in the dry friction state in the pin-on-disc assembly. It was determined that the increase of the α phase in the microstructure of the synchronizer rings from 8% to 23% by volume decreased the hardness value from 281 to 250HV but increased the wear resistance of the material. They concluded that, depending on the type of test and the counter surface, the increase in wear resistance of the synchronizers ranged from 15% to 80%.

In this current study, the wear behavior of the plain bearing material of monoblock stands used in Wire Rod Mills around the world in dry friction condition was investigated. Ball-on-flat experimental setup was used in this experimental study. Copper alloy material was used as the bearing material and 100Cr6 bearing steel with a diameter of 6mm was used as the abrasive. The experiments were carried out at three different sliding speeds, 10 rpm, 30 rpm and 50 rpm, and at three different loads, 10 N, 20 N and 30 N. The mentioned parameters were chosen in the light of preliminary experiments and close to the values in the literature [8,9]. Wear values were measured as mass loss in mg, and wear was

analysed visually and elementally using SEM, EDX. Analysis of Variance (ANOVA) method was used for the statistical analysis of the test results and mass loss, friction coefficient and surface roughness measurements were made. As a result of the study, it has been revealed that load change is a parameter that is approximately three times more effective than speed change in dry friction.

2. Materials and Method

2.1. Preparation of specimens

The chemical composition of the bearing material is given in Table 1. The specimens used were prepared in the dimensions of 30 mm x 30 mm and were connected to the specimen slot in the experimental setup by using the clamping apparatus. The specimens were grounded by SiC emery paper before the experiments. In Figure 1, the SEM view surface of the grounded specimen is given. In Table 2, the hardness of the bearing material and the average surface roughness values before and after sanding are given. Values were taken from three different points on the specimen.

Table 1. Chemical composition of bronze bearing material

Element	Cu	Sn	Ni	Pb	Zn	Al	Mn	Fe	Others
[wt%]	86.88	1.45	3.63	3.68	0.00	0.22	0.41	0.44	3.29

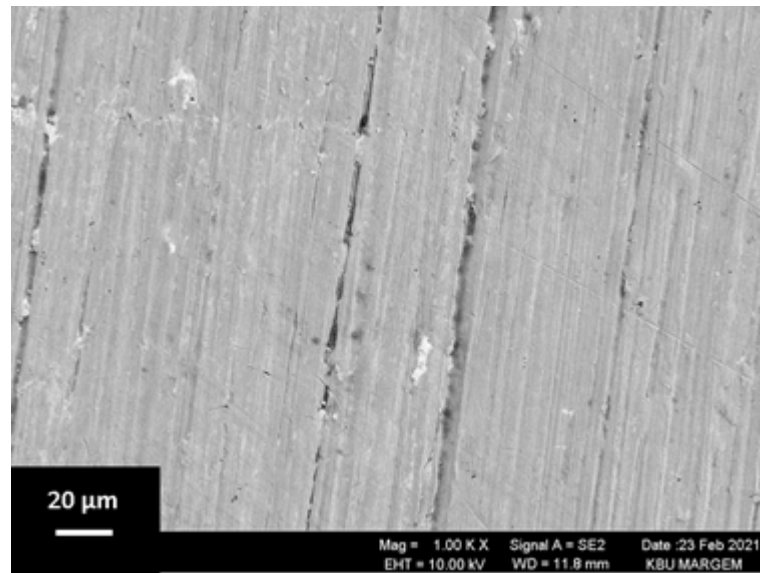


Figure 1. SEM image of the surface sanded with SiC emery paper

Table 2. Hardness and surface roughness values of bearing material

Measured surface hardness value [HV]	Surface roughness before sanding, Ra [μm]	Surface roughness after sanding, Ra [μm]
60.9 ±0.67	2.268 ±0.685	0.274 ±0.022

2.2. Abrasive wear tests

The wear tests of the bearing material were carried out by using the Ball-on-flat test apparatus on the two-functional test equipment containing the Pin-on-disc and Ball-on-flat apparatuses, which are visualized in Figure 2. The rotational movement obtained from an electric motor on the said mechanism is converted into a linear movement with the help of the mechanism it is connected to. The stroke length is 13 mm, and this value gives the length of the traces obtained on the specimen surfaces. The rotational speed of the mentioned electric motor can be changed with a drive system in order to obtain the desired abrasive speed. There is a load arm that balances at no load on the assembly, allowing the position of the abrasive ball to be adjusted depending on the specimen thickness. While adjusting, the horizontal position of the arm can be controlled with the help of a spirit level. There is a chamber (pot) that can be used to create a liquid medium for placing the specimen to be abraded. The experiments were carried out at room temperature and no significant temperature increase was observed in the specimen during the preliminary experiments.

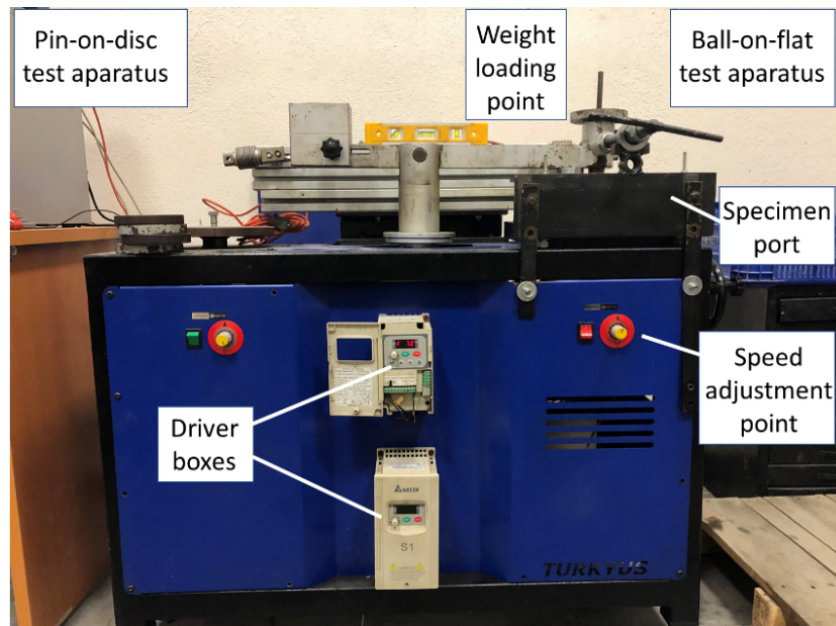


Figure 2. Ball-on-flat test rig

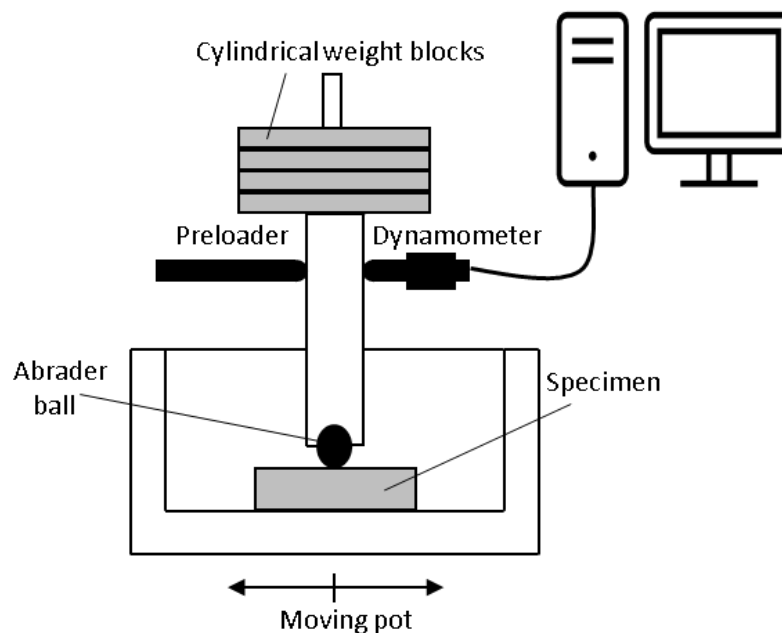


Figure 3. Schematic image of the experimental setup

As an abrasive, 100Cr6 (AISI 52100-64HRC) ball material with 6 mm diameter spherical geometry was used in order to be resistant to test specimens [3,10-13]. After each experiment, the ball was changed, and the new experiment was started with a new abrasive ball. The chemical composition of the abrasive ball obtained by EDX is given in Table 3. According to the preliminary experiments, three different load values as 10 N, 20 N, and 30 N and three different rotational speed values of 10 rpm, 30 rpm, and 50 rpm were determined in the experiments to be carried out. The sliding speed values corresponding to the number of revolutions are given in Table 4. The experiments were carried out in 9 different experimental conditions according to the full factorial experimental design (3 load x 3 speed) and these test parameters are given in Table 5. Three replications were made for each experimental condition. After the experiments, the specimens were cleaned using compressor air set to 7 bar in order to remove the wear residues and not affect the weighing results. Before weighing, it was dried for 3 minutes with the help of a blow dryer in order to remove possible moisture from the compressor. After all these processes, mass losses were measured with a DENSI brand HZY 320 A model precision balance with a weighing sensitivity of 0.1 mg.

Table 3. Chemical composition of the 100Cr6 abrader ball

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu
wt%	0.95	0.35	0.025	0.015	0.25	0.30	1.55	0.3

Table 4. Speed parameters conversion table

Rotational Speed [rpm]	Sliding Speed [mm/s]
10	8.66
30	26.00
50	43.33

Table 5. Parameters used in the experiments

Exp. No	Load [N]	Rotational Speed [rpm]	Sliding Distance [m]
1	10	10	100
2	10	30	
3	10	50	
4	20	10	
5	20	30	
6	20	50	
7	30	10	
8	30	30	
9	30	50	

2.3. Statistical Analysis

This experimental study was carried out as full factorial. Nine (3*3) experiments were carried out using three different loads and three different speeds. Experiments were repeated three times for each condition. As a result of the experiments, three different outputs were obtained, namely mass loss, friction coefficient and trace depth. In order to quantitatively determine the effects of input variables on output variables and to see the effects of input parameters on output values, full quadratic ANOVA was performed on the experimental results. ANOVA (Analysis of Variance) is a method used to determine possible relationships and relationship strengths between inputs and outputs [14]. Analysis values revealed which input variable was effective on the results for system optimization. Equations were obtained by using the Response Surface Method (RSM) according to the mass loss, friction coefficient and trace depth results. In addition, R-Square values were obtained by comparing the experimental results and the estimated results obtained from the modeling. The R-Sq value is an indicator of whether the experiments were successful or unsuccessful. It can be stated that the experimental significance of wear is 70% and above, and the results are sufficient for the R-Sq value obtained. Minitab software program was used in all analysis procedures [3]. While performing the statistical analysis, the 95% confidence interval was taken into account [15]. In this statistical method, the statistical and physical importance is the p value, the order of importance is the F value, and the effect of the input parameters on the output parameters is the % effect value [16]. P value less than or equal to 0.05 indicates that physical and statistically significant results occur [17].

3. Results and Discussions

3.1. Mass Loss

Mass losses, friction coefficients, and trace depths were measured at different load and speed values used in the experiments. The mass loss, friction coefficient, and trace depth values obtained as a result of three different tests for each test condition are given in Table 6.

The amount of mass loss according to the sliding speed and load values are given graphically in Figure 4. According to the obtained mass loss values, the lowest mass loss value of 3.3 mg was obtained under 10 N load and 8.66 mm/s sliding speed conditions. The highest value was 21.3 mg, and the highest load value was 30 N and the highest speed value was 43.33 mm/s.

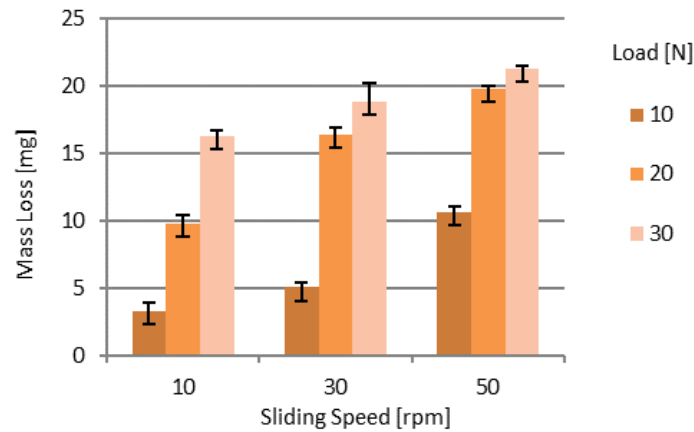


Figure 4. Mass loss values obtained from the wear

Table 6. Mass loss, friction coefficient, and trace depth values

Exp. No	Load [N]	Sliding Speed [rpm]	Mass Loss [mg]	Friction Coefficient	Trace Depth [μm]
1	10	10	3.3 ± 0.624	0.446 ± 0.012	43.63 ± 6.1
2	10	30	5.1 ± 0.300	0.435 ± 0.006	58.17 ± 2.6
3	10	50	10.7 ± 0.361	0.411 ± 0.012	91.80 ± 9.1
4	20	10	9.8 ± 0.608	0.435 ± 0.016	90.3 ± 5.0
5	20	30	16.4 ± 0.557	0.421 ± 0.028	127.67 ± 7.6
6	20	50	19.8 ± 0.265	0.395 ± 0.011	132.00 ± 2.6
7	30	10	16.3 ± 0.458	0.541 ± 0.002	191.67 ± 11.0
8	30	30	18.9 ± 1.353	0.514 ± 0.035	211.00 ± 8.5
9	30	50	21.3 ± 0.265	0.485 ± 0.013	260.33 ± 3.8

According to the ANOVA, the effect rate of the load parameter, which is the most effective parameter in dry friction conditions, on the results was found to be 66.261% (Table 7). As the load increases, the mass loss also increases.

The same can be said for speed. The 2.495% error value obtained as a result of the analysis can be said to be caused by the vibration and material microstructure that has not been taken into account [3]. The effect rate of the second variable, the speed parameter, was found to be 24.447%. In addition, equation (1) was obtained for mass loss calculation with the RSM. The R^2 value was calculated based on the experimental results and the values from the regression calculation, and this value was found to be 0.975 and is given in Figure 5. High value indicates good regression model fit.

Table 7. ANOVA analysis table for mass loss

Source	Degree of Freedom (DoF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value	Parameter Contribution Rate [%]
A - Load [N]	1	226.66	226.66	79.67	0.003	66.261
B - Speed [rpm]	1	83.627	83.627	29.4	0.012	24.447
AxA	1	14.942	14.942	5.25	0.106	4.368
BxB	1	1.472	1.472	0.52	0.524	0.430
AxB	1	1.83	1.83	0.64	0.481	0.535
Error	3	8.535	2.845			2.495
Total	8	342.069				100.000

$$\text{Mass Loss (ML)}[mg] = -16.70 + 1.811x_A + 0.392x_B - 0.0273x_A^2 - 0.00231x_B^2 - 0.00335x_Ax_B \quad (1)$$

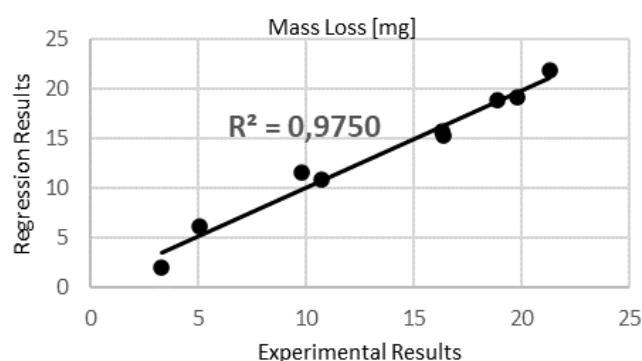


Figure 5. Comparison of experimental results and RSM values for the mass loss

3.2. Coefficient of friction

ANOVA shows that the most effective parameter for friction coefficient values is the load parameter, and the effect rate on the results was found to be 53.021%, as seen in Table 8. The 0.14% error value obtained because of the analysis, on the other hand, can be said to occur due to unconsidered parameters like the mass loss [3]. The effect rate of the second variable, the speed parameter, was found to be 14.793%. In addition, equation (2) was obtained for the coefficient of friction calculation with the RSM. The R^2 value was calculated based on the experimental results and the values from the regression calculation, and this value was found to be 0.9988 and is given graphically in Figure 7. A high value indicates good regression model fit.

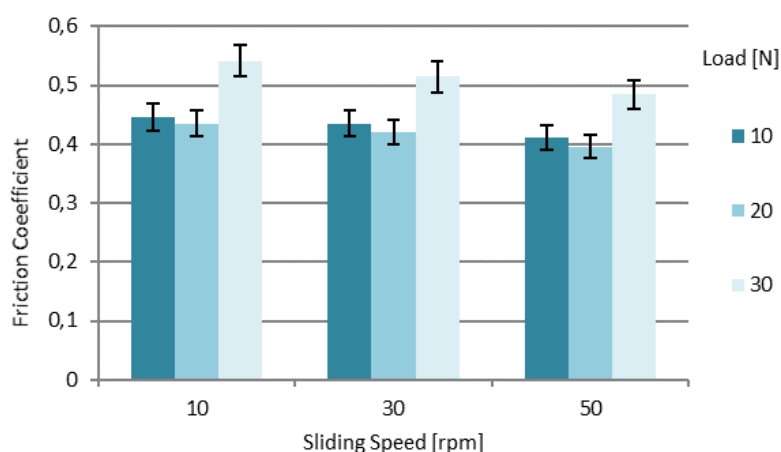


Figure 6. Friction coefficient values obtained from the wear tests

$$\text{Coefficient of Friction (CoF)} = 0.56421 - 0.017079xA + 0.000108xB + 0.000550xA^2 - 0.000011xB^2 - 0.000026xAxB \quad (2)$$

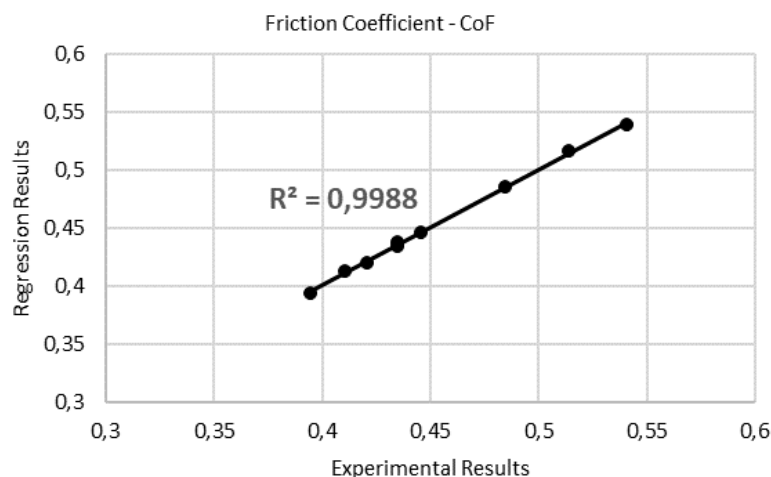


Figure 7. Comparison of experimental results and RSM values for the coefficient of friction

3.3. Inspection of wear profiles and surfaces

In this study, the wear mechanisms on the surfaces were investigated using the ZEISS ULTRA PLUS scanning electron microscope, which is shown in Figure 8a. EDX analyses were performed to determine the wear mechanisms on the surface. The surface roughness values obtained as a result of the specimen preparation processes before the experiment were measured in the Mitutuyo SJ-410 model surface roughness measuring device, whose image is given in Figure 8b, and trace forms (Figure 9) were obtained with the help of the same device. The sampling numbers were chosen as 3 for surface roughness measurements and for wear trace form determinations.

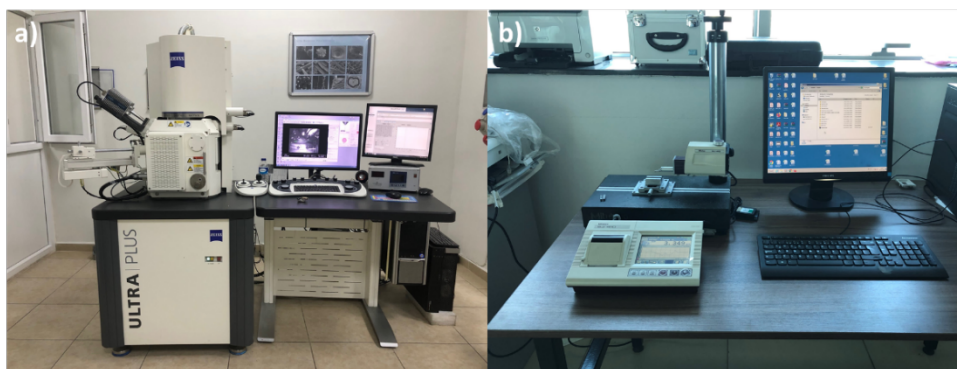


Figure 8. (a) SEM device image, (b) Roughness measuring device image

Table 8. ANOVA analysis table for coefficient of friction

Source	Degree of Freedom (DoF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value	Parameter Contribution Rate [%]
A - Load [N]	1	0.010251	0.010251	1371.84	0.00004	53.021
B - Speed [rpm]	1	0.00286	0.00286	382.77	0.00029	14.793
AxA	1	0.00605	0.00605	809.67	0.0001	31.292
BxB	1	0.00004	0.00004	5.42	0.10232	0.207
AxB	1	0.00011	0.00011	14.75	0.03112	0.569
Error	3	0.000022	0.000007			0.114
Total	8	0.019334				100.000

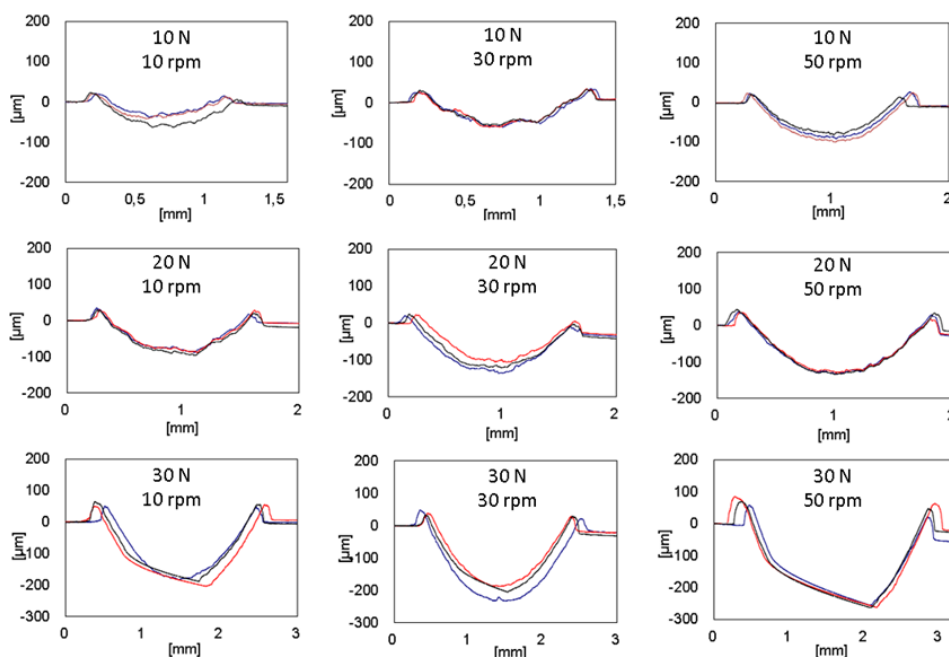


Figure 9. Trace profiles resulting from wear

ANOVA shows that the most effective parameter for trace depth values is the load parameter, as in other outputs. As can be seen from Table 9, it was found to be 85.688%. As a result of the analysis, an error value of 1.086% was found. The effect rate of the second variable, the speed parameter, was found to be 9.760%. Equation (3) was obtained for the trace depth calculation. R^2 value was calculated using experimental results and estimation values and this value was found as 0.9891. R^2 graph is given in Figure 11. According to this graph, it was concluded that the regression model fit was good.

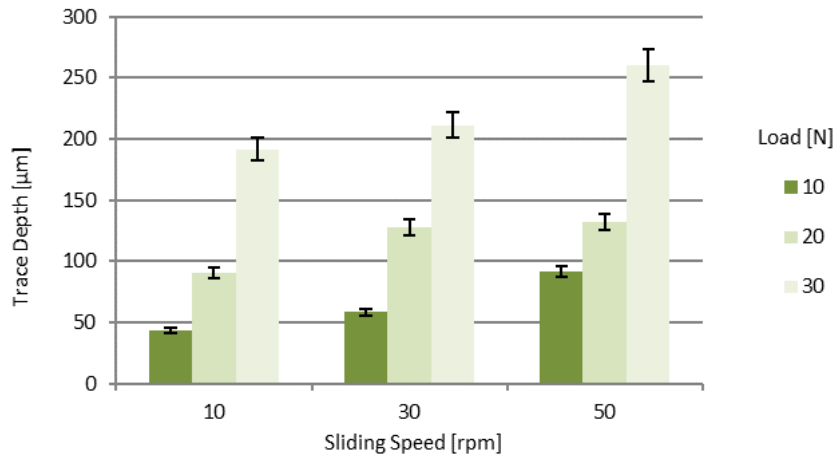


Figure 10. Trace depth values obtained from the wear tests

Table 9. ANOVA analysis table for trace depth

Source	Degree of Freedom (DoF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value	Parameter Contribution Rate [%]
A - Load [N]	1	36774.9	36774.9	236.72	0.001	85.688
B - Speed [rpm]	1	4188.8	4188.8	26.96	0.014	9.760
AxA	1	1369.4	1369.4	8.81	0.059	3.191
BxB	1	13.2	13.2	0.08	0.079	0.031
AxB	1	105.1	105.1	0.68	0.471	0.245
Error	3	466	155.3			1.086
Total	8	42917.4				100.000

$$\text{Trace Depth (TD)}[\mu\text{m}] = 44.5 - 3.41xA + 0.42xB + 0.2617xA^2 + 0.0064xB^2 - 0.0256xAxB \quad (3)$$

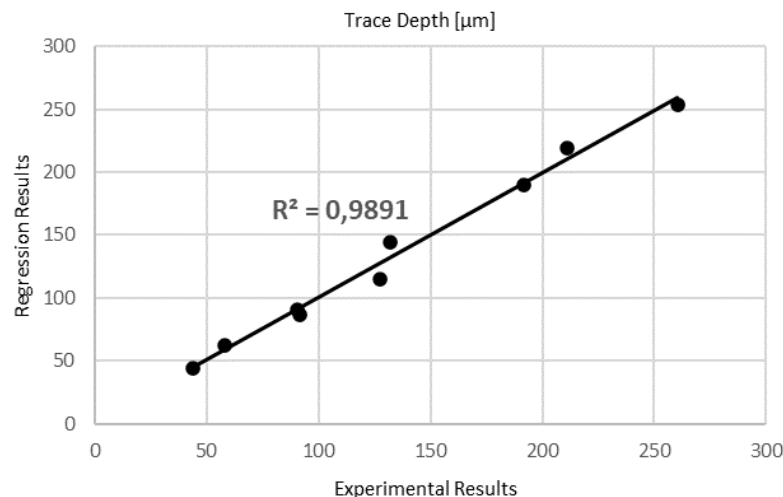


Figure 11. Comparison of experimental results and RSM values for the trace depth

SEM images were examined to determine the wear mechanisms on the surfaces. SEM images of the wear profiles obtained from the experiments carried out with all load and speed variables are given in Figure 12, respectively. As can be seen from the SEM images, the mass loss and the trace depth values are compatible with each other. When the results obtained are examined, the parameters with the highest wear and trace depth values are 30 N load and 50 rpm values. The wear mechanisms of the surface obtained as a result of this experiment are shown on SEM images in Figures 13 and 14. No excessive deformation was observed in most parts of the surface on the wearing surfaces. Uniformly eroded areas were also found on the wear surface. In the EDX micro-analyses, particles that broke off from the abrasive sphere and penetrated the material surface were found. The fact that the Cr element was found in the investigated area is the biggest indicator of this. Also, in EDX micro-analysis, particles penetrated to the surface were also found on the material surface. Ploughing marks on the surface are not very deep and are present in many parts of the surface. In places, delamination and large amounts of material smearing were also observed. Particularly in areas where material agglomeration occurs, interlayer embedded particles were found. There are also furrows in the areas close to the material agglomerations. Although not extremely deep, there are also pitting areas. When the trace profiles are examined, it is seen that there is a more indented structure in the profiles at low load values. As the load value increases, the roughness of the profiles decreases. The same can be said for low-speed values. Profile roughness decreases at high-speed values.

Table 10. List of surface defects detected in SEM images

Abbreviations	Type of wear mechanism
ABP	Abrasive ball particle
SPD	Severe particle deformation
EP	Embedded particle
PL	Ploughing
MA	Material agglomeration
S	Smearing
P	Pitting
F	Furrows
D	Delamination

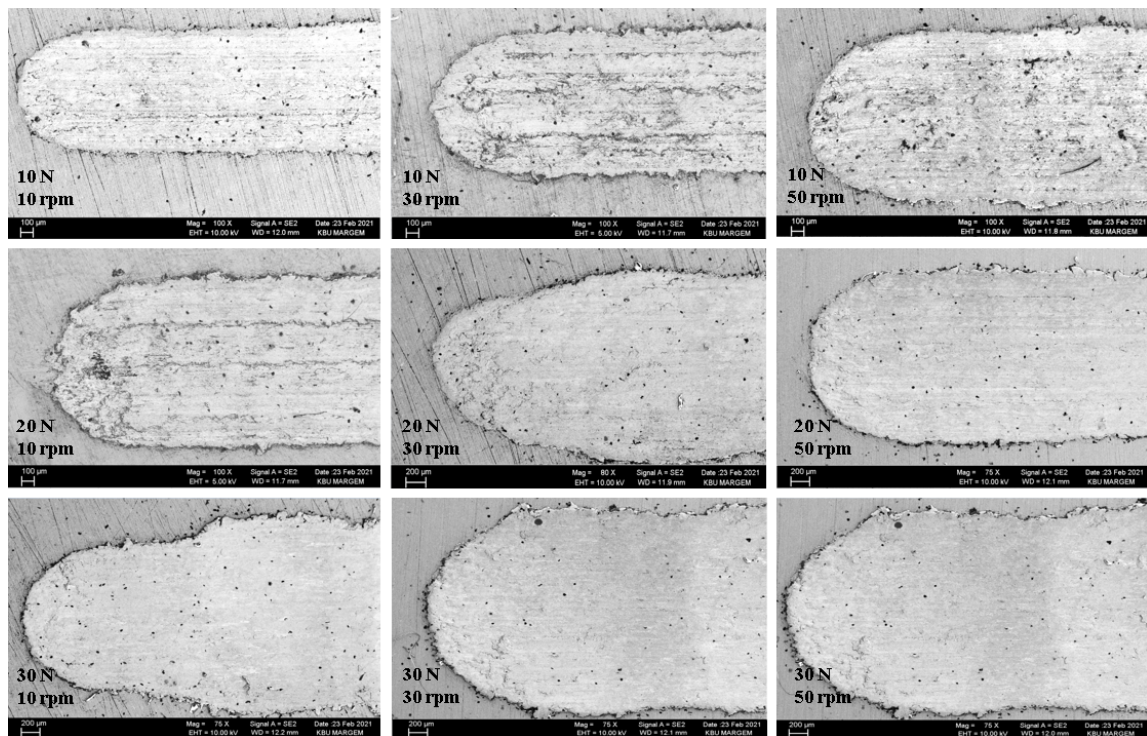


Figure 12. SEM images of the worn surface

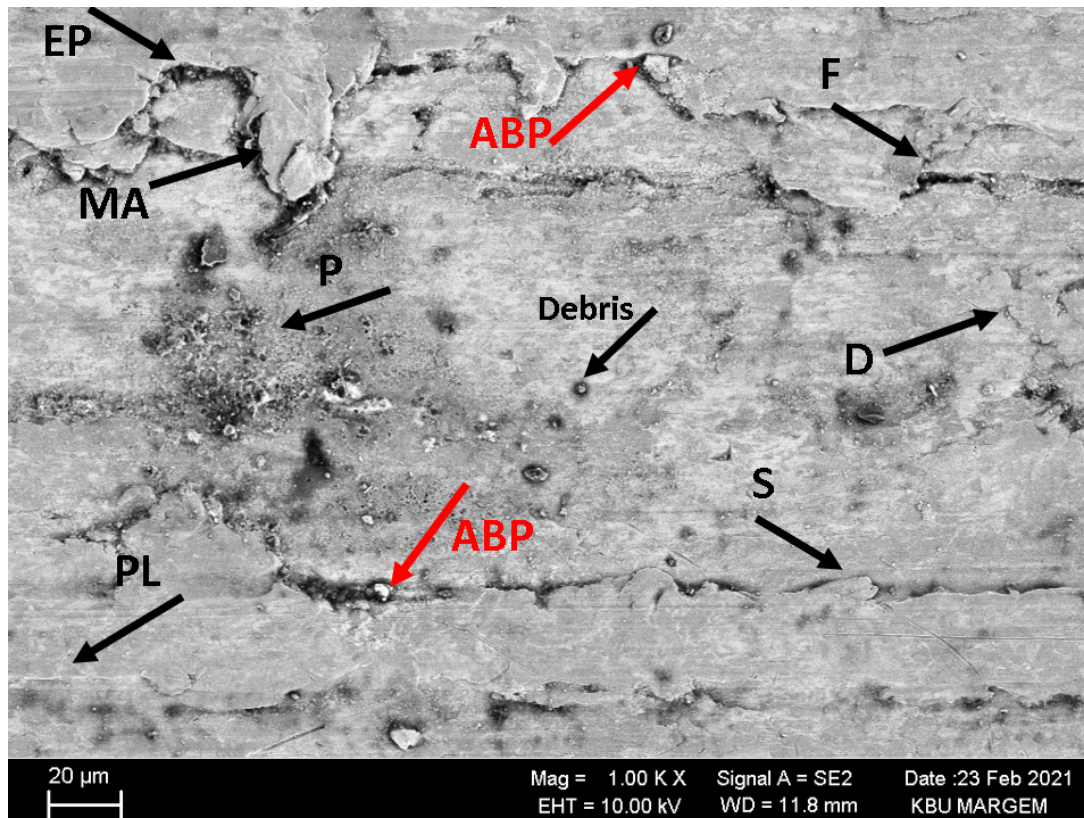


Figure 13. SEM image of material exposed to wear at 30 N load and 50 rpm sliding speed

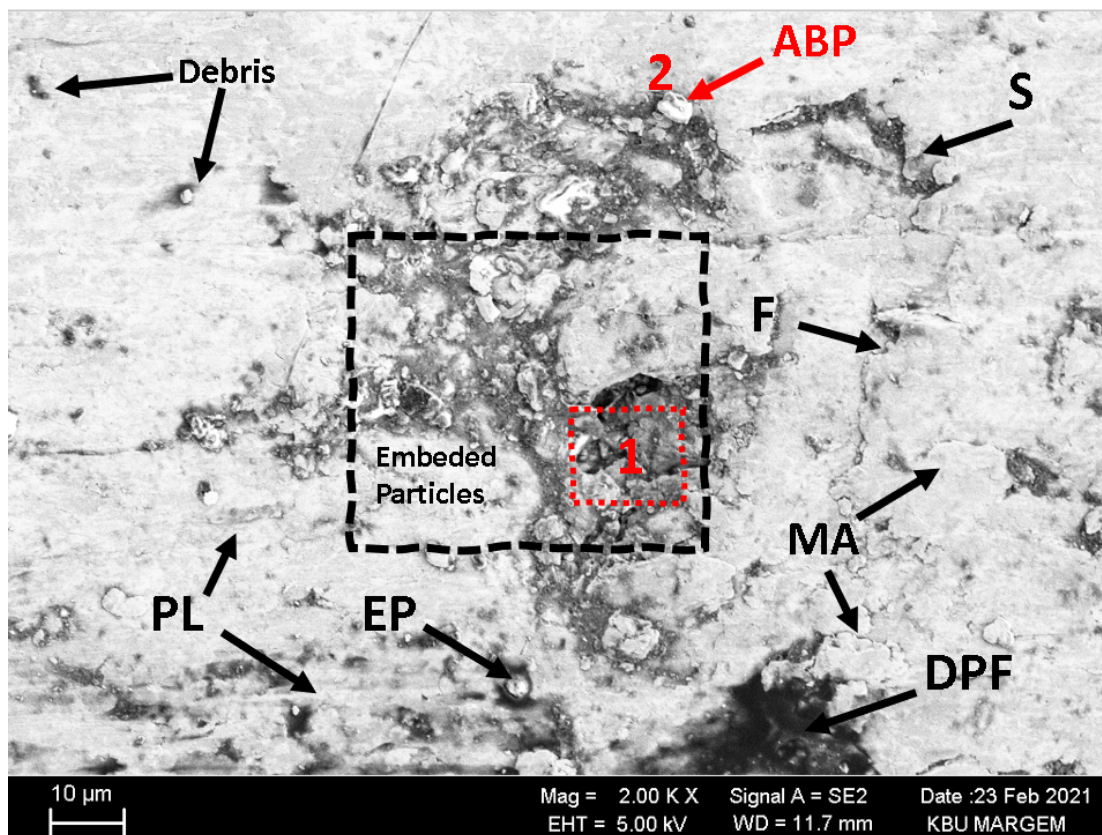


Figure 14. SEM image of material exposed to wear at 30 N load and 50 rpm sliding speed

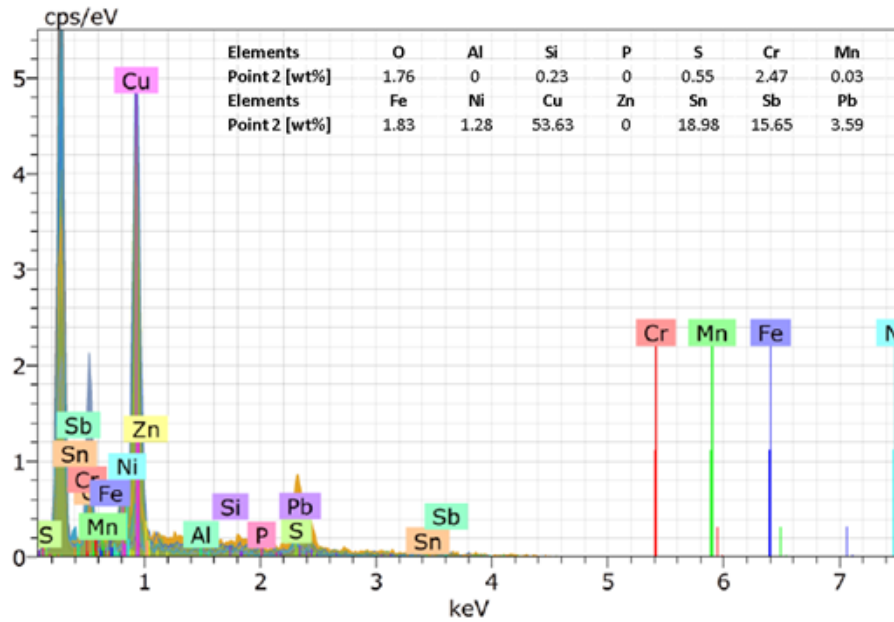


Figure 15. EDX micro analysis values of Point 2 on Figure 14

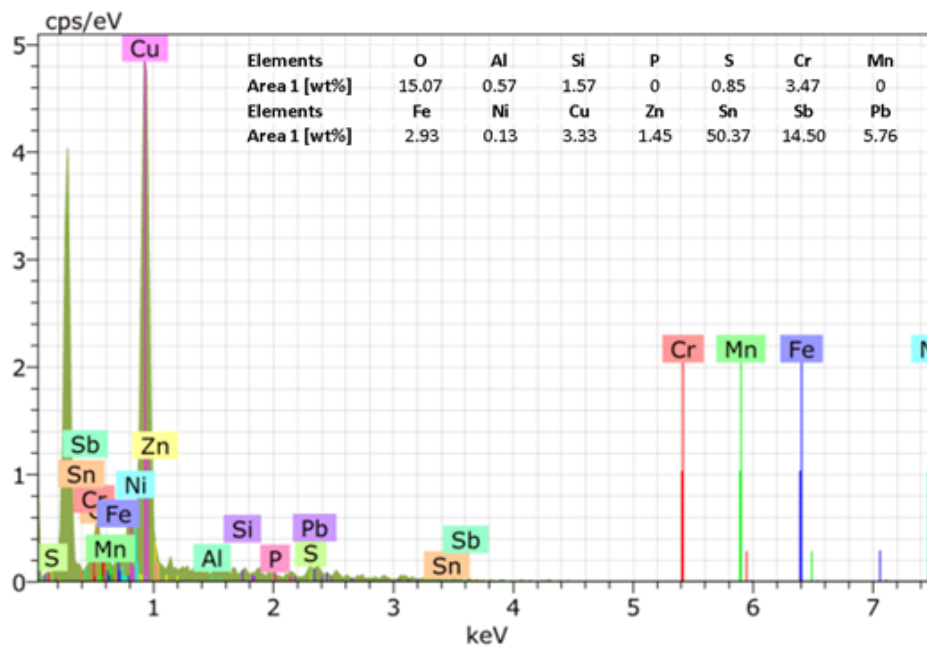


Figure 16. EDX micro analysis values of Area 1 on Figure 14

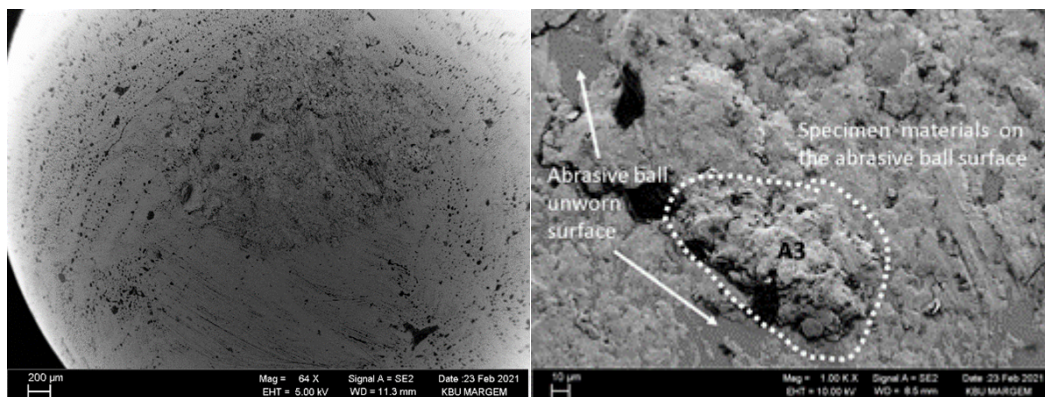


Figure 17. SEM images of the abrasive ball surface

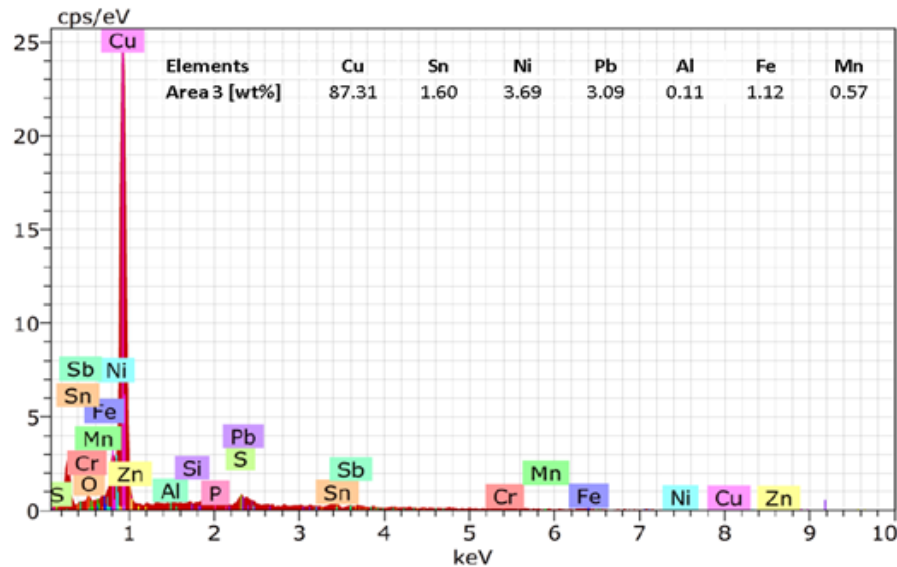


Figure 18. EDX micro analysis values of Area 3 on Figure 17

3. Conclusions

In this study, the bronze bearing material used as a plain bearing was subjected to dry sliding at different load and speed values. As a result of the experiments, results such as mass loss, friction and trace depth were obtained, and these results were analysed. Experimental results were analysed using the ANOVA method. In addition, SEM and EDX images were taken from the specimen's surfaces and evaluations were made on the surface wear. It can be evaluated in terms of the results obtained.

1. It can be clearly said that the independent variable effective on mass loss in dry friction conditions is load. The effect rate of the load on the wear was determined as 66.261%. In addition, the effect of the load decreases after 20 N. The effect rate of the speed is 24.447% and the wear effect increases with the increase in speed, but this change is linear. According to the ANOVA results, it can be said that the effects of the load and speed variables are significant since the P value is less than 0.05. However, since the squares and interaction values of the variables are greater than 0.05, it can be said that they do not have statistical effects. The R^2 value between the mass loss values calculated using the model formula obtained with RSM and the experimental results was 0.975, and the high value of this value indicates that the regression model fit is good.

2. Again, the load is the effective variable in determining the friction coefficient. This rate was determined as 53.021%. The friction coefficient value of 20 N, which is the intermediate value for each speed value in the change of load, has been determined as the smallest values. It can be said that the load and speed variables are significant according to the ANOVA results. It can be said that it is statistically insignificant only because the effect of the square of the velocity value is greater than 0.05. The R^2 value between the friction coefficient values obtained because of the model calculation and the experimental results was found to be 0.9988, and it is seen that the regression model fit is good.

3. The results obtained for the trace depth showed that the load variable was quite effective. There is an impact rate of 85.688%. It can be said that the trace depth results are essentially parallel to the mass loss values. The effect of the load change increases after 20 N, unlike the mass loss. As a result of ANOVA, although the load and velocity values are statistically effective, they are statistically ineffective because the squares of the variables and the interaction value are greater than 0.05. In the regression analysis, the R^2 value was found to be 0.9759, and the regression model fit was quite good.

4. The load variable emerged as the most effective parameter on the mass loss, friction coefficient and trace depth values because of the experiments performed on the ball-on-flat experimental setup, and these values were determined as 66.261%, 53.021% and 85.688%, respectively.

By using the models obtained in the light of the analysis revealed in this study, parameters can be selected to obtain appropriate friction coefficient and low wear values without experimental studies.

Acknowledgment

This study was supported by Karabük University Scientific Research Projects with Project number of KBÜBAP-21-ABP-062.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] E. De Robertis, E.H.H. Cosme, R.S. Neves, A.Y. Kuznetsov, A.P.C. Campos and S.M. Landi, "Application of the modulated temperature differential scanning calorimetry technique for the determination of the specific heat of copper nanofluids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 41, pp. 10–17, 2012. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.01.003.
- [2] S. M. S. Murshed, "Determination of effective specific heat of nanofluids," *Journal of Experimental Nanoscience*, vol. 6 no. 5, pp. 539–546, 2011. doi:10.1080/17458080.2010.498838.
- [3] M. H. Cetin and S. Korkmaz, "Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method," *Tribology International*, vol. 147, pp. 106273, 2020. doi:10.1016/j.triboint.2020.106273.
- [4] R. A. García-León, J. Martínez-Trinidad, R. Zepeda-Bautista, I. Campos-Silva, A. Guevara-Morales, J. Martínez-Londoño and J. Barbosa-Saldaña, "Dry sliding wear test on borided AISI 316L stainless steel under ball-on-flat configuration: A statistical analysis," *Tribology International*, vol. 157, 2021. doi:10.1016/j.triboint.2021.106885.
- [5] A. N. Sudhakar, R. Markandeya, B. Srinivasa Rao, Ajoy Kumar Pandey and D. Kaushik, "Effect of alloying elements on the dry sliding wear behavior of high chromium white cast iron and Ni-hard iron," *Materials Today: Proceedings*, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2021.09.295.
- [6] Elleuch, Khaled, Riadh Elleuch, Ridha Mnif, Vincent Fridrici, and Philippe Kapsa, "Sliding Wear Transition for the CW614 Brass Alloy," *Tribology International* vol. 39 no. 4, pp. 290–96, 2006. doi:10.1016/j.triboint.2005.01.036.
- [7] Mindivan, H., H. Çimenoglu, and E. S. Kayali, "Microstructures and Wear Properties of Brass Synchroniser Rings," *Wear* vol. 254, no. 5–6, pp. 532–37, 2003. doi:10.1016/S0043-1648(03)00023-1.
- [8] L. Xu, Y. Zhang, D. Zhang and M. Leng, "Preparation and tribological properties of Ag nanoparticles/reduced graphene oxide nanocomposites," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 70, pp. 1684–1691, 2017. doi:10.1108/ILT-03-2017-0054.
- [9] G. Pitchayapillai, P. Seenikannan, P. Balasundar and P. Narayanasamy, "Effect of nanosilver on microstructure, mechanical and tribological properties of cast 6061 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, pp. 2137–2145, 2017. doi:10.1016/S1003-6326(17)60239-5.
- [10] H. Ghaednia, M.S. Hossain and R.L. Jackson, "Tribological Performance of Silver Nanoparticle-Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants," *Tribology Transactions*, vol. 59, pp. 585–592, 2016. doi:10.1080/10402004.2015.1092623.
- [11] L. Gara and Q. Zou, "Friction and wear characteristics of oil-based ZnO nanofluids," *Tribology Transactions*, vol. 56, pp. 236–244, 2013. doi:10.1080/10402004.2012.740148.
- [12] H. Xie, B. Jiang, J. He, X. Xia and F. Pan, "Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts," *Tribology International*, vol. 93, pp. 63–70, 2016. doi: 10.1016/j.triboint.2015.08.009.
- [13] Y. Y. Wu, W. C. Tsui and T. C. Liu, "Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives," *Wear*, vol. 262, pp. 819–825, 2007. doi: 10.1016/j.wear.2006.08.021.
- [14] N. Yalçın, Y. Kayır ve S. Erkal, "AA2024 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Yaşlandırma Yöntemlerinin İşlenebilirliğe Etkisinin Taguchi ve Anova ile Araştırılması," *Journal of Polytechnic*, cilt 20, sayı 4, ss. 743–51, 2017. doi:10.2339/politeknik.368552.
- [15] E. Nas, E. Zurnacı ve S. Yıldırım, "Sertleştirilmiş AISI H13 Takım Çeliğinin Delme Performansını İyileştirmek İçin Elektro Erozyon İşleme Parametrelerinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Optimizasyonu," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, cilt 7, sayı 2, ss. 99–110, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.03.
- [16] B. Özlü, M. Akgün ve H. Demir, "AA 6061 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi ve Optimizasyonu," *Gazi J. Eng. Sci.*, cilt 5, sayı 2, ss. 151–158, 2019. doi:10.30855/gmbd.2019.02.04.
- [17] B. Kondul, "Borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, KBÜ, Karabük, Türkiye, 2020.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Mechanical Properties on Coated Terminal Tip by Co-design

Mert Onan^a, Ahmet Celal Topkaya^b, Eyyüp Öksüztepe^c

Submitted: 27.11.2021 Revised: 21.03.2022 Accepted: 07.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.09

ABSTRACT

Keywords: Terminal, CuNiSiP, Finite Element Analyses, Gold-plated, Mechanical Properties

^a Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Avcılar-İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8793-8215

^b Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Avcılar-İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8646-7338

^c Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Merkez-Elazığ, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5446-4308

*Corresponding author:
mertonan@yahoo.com,
mert.onan@hatkoelectronics.com

Copper alloys used in the automotive and white goods industry are preferred as terminals due to their high conductivity. For low contact resistance and high mechanical strength of copper alloys, appropriate design selection becomes important. As a result of the coating of copper alloy, current transition level of the conductive terminal and the formation of a film that protects against corrosion on the surface are improved. The aim is to optimize the PCB terminals to be made of CuNiSiP material according to the contact forces and to produce them as gold-plated. Production is done for the CuNiSiP copper alloy supplied within the developing dimensions. With the FEA, contact forces were calculated according to different contact diameter and oral cavity parameters. The surface roughness was measured from the product contact point after the final design. The surface roughness data in the cutting zone were compared again after the prototype production, depending on the number of cycle period. During prototype production, sensitive area of terminal tip was characterized by Electron Microscopy. After the characterization, coating thickness of gold-plated regions was measured as minimum 0.8 μm by X-ray Analyses. It is experimentally proven that contact forces of PCB terminal meet the requirements.

Kaplamalı Terminal Blok Ucunda Tasarımsal Değişim Yapılarak Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

ÖZ

Otomotiv ve beyaz eşya sektöründe kullanılan bakır alaşımlarının iletkenlikleri yüksek olmasından dolayı terminal olarak tercih edilmektedir. Bakır alaşımlarının düşük kontak direnci, yüksek mekanik dayanım için uygun tasarım seçimi önemli hale gelmektedir. Bakır alaşımın kaplanması neticesinde iletken terminalin akım geçiş seviyesi ve yüzeyde korozyondan koruyan film oluşumu geliştirilmektedir. Bu çalışma da amaç CuNiSiP malzemeden imal edilecek PCB terminallerinin kontak kuvvetlerine göre optimize etmek ve altın kaplamalı olarak üretmektir. Yapılan Sonlu Elemanlar Analizleri ile farklı kontak çapı ve ağız boşluğu parametrelerine göre kontak kuvvetleri hesaplanmıştır. Tasarım sonrası ürün kontak noktalarında yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğu ölçülmüştür. Kesme bölgesindeki yüzey pürüzlülük verileri devir sayısına bağlı olarak prototip üretim sonrası tekrar kıyaslanmıştır. Terminal ucu hassas bölgesinde Elektron Mikroskobisi ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonrası altın kaplanan bölgelerin kaplama kalınlığı min. 0.8 μm X-ray cihazında ölçülmüştür. Üretilen PCB terminalinin kontak kuvvetlerinin gereksinimleri karşıladığı deneysel olarak ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Terminal, CuNiSiP, Sonlu Elemanlar Analizi, Altın Kaplama, Mekanik Özellikler

1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel olarak terminal uygulamalarına talep, elektronik kontrol ünitelerinin artmasıyla çoğalmıştır. Otomotiv sektöründeki terminal uygulamaları çevresel koşullara bağlı olarak yüksek deformasyona, sıcaklığa ve neme maruz kalmaya dirençli olmalıdır. Uzun süreli sıcaklık ve nem dayanımının yanında düşük kontak direnci gösterebilen terminaller üretilebilmelidir. Ayrıca güç ve elektrik aksamlarındaki terminaller için yüksek sıcaklık direncine bağlı kaplama ve özellikleri önem kazanmaktadır [1]. Birçok çalışmada terminallerin farklı koşullardaki etkisi boyutsal olarak tasarım dikkate alınarak çalışılmıştır [2-5]. Otomotiv terminallerinin gerçek zamanlı simülasyon ve test uygulamaları zordur. Farklı boyut ve geometrilere sahip bakır alaşımlarının, yapılan sayısal analizlere göre, 10 N'den düşük kuvvetlerde yüzey pürüzlülüğünün kontak direnci üzerinde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir [5]. Terminallerin aşınma davranışı, uygulama yerlerine bağlı olarak üretildikleri hammadde ile ilişkilidir [6]. Bakır alaşımlarında yüksek elektrik iletkenliği sağlanırken yapıya bağlı olarak mukavemet azalmaktadır [7]. Kontak kuvvetinin terminale etkisi, terminalin takma çıkarma sayısına bağlı olarak mekanik deformasyonunu ANSYS yazılımı Sonlu elemanlar analizi (SEA) ile doğrulanmıştır. Buna ek olarak ağırlık kaybı ve aşınma davranışı ile kıyas yapılmıştır [8,9]. Bu konudaki çalışmalar sınırlı olmayıp aynı zamanda otomotiv terminallerinde takma çıkmaya bağlı kuvvetin azaldığı, dokuz takma çıkarmada pinin girdiği terminalin yüzeyinde aşınma izleri gözlenmiştir [10]. Ayrıca krimpleme yapılan terminallerdeki ayak kısımlarında kesmeye bağlı sürtünme SEA analizleri ile incelenmiş ve zımbanın sürtünmesinin krimp kalitesini etkilediği vurgulanmıştır [11, 12].

Bu çalışma da tedarik edilen CuNiSiP bakır alaışımının kalıpta kesme yapılarak uygun tasarımsal ölçülerde üretilmesi hedeflenmiştir. Yapılan SEA çalışması ile alaışımın farklı kontak kuvvetini etkileyen kontak çapı ve ağız boşluğu değişimine dair hesaplamalar ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. Kesme bölgesindeki yüzey pürüzlülük verileri üretim öncesi ve devir sayısına bağlı olarak prototip üretim (50.000 adet) sonrası tekrar kıyaslanmıştır. Üretim sonrası terminal ucu hassas ezme bölgesinde Taramalı Elektron Mikroskopisi ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonrası nikel ve altın kaplanan bölgelerin kaplama kalınlık ölçümü X-ray cihazında gerçekleştirilmiştir.

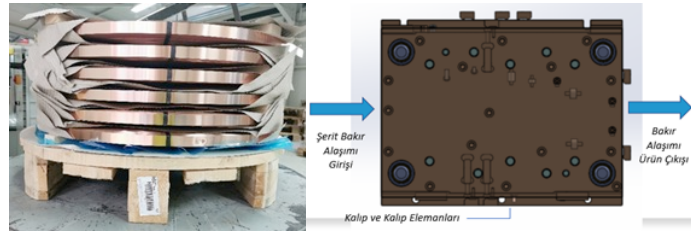
2. Materyal ve Metod (Material and Method)

Terminal blok tasarımı için gereken malzeme CuNiSiP şerit formunda bakır malzeme olup ilgili malzeme tedarikçimiz Wieland Electric GmbH (Almanya) temin edilmiştir. CuNiSiP malzemenin mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de sunulmuştur [13].

Tablo 1. CuNiSiP malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri
(Chemical and mechanical properties of CuNiSiP material)

Kimyasal Kompozisyon				
	Ni (%)	Si (%)	P (%)	Cu (%)
CuNiSiP (UNS C19010) R520 Temper	0.283	0.283	0.283	0.283
Mekanik Özellikler				
	Çekme Mukavemeti (Rm-MPa)	Akma Mukavemeti (R0.2-MPa)	Uzama (A- %)	Sertlik (HV)
CuNiSiP (UNS C19010) R520 Temper	520 - 590	> 440	> 9	150 - 180

Terminalin üretimi Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiş olup hammadde malzeme ve üretilen terminalin kalıp görseli Şekil 1'de verilmiştir. Şerit bakır alaşımı bir taraftan hatta girerken diğer taraftan prestan geçirilerek biçimlendirilmiş ürün elde edilir.



Şekil 1. Terminal hammaddesi ve terminal üretimi yapılan kalıp geometrisi
(Terminal raw material and die geometry of terminal production)

Terminalin kalıp üretimi sonrası kontrol edilen tasarımsal geometrik toleranslar MITUTOYO Keyence ve Quickscope cihazı yardımıyla alınmıştır. Böylece istenen tasarım ölçülerinde terminal üretimi fiziki olarak doğrulanmıştır.

Bu çalışmada SEA analizleri yapılarak terminalin kontak alanının çapı ve ağız boşluğunun kontak kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kontak alanı çapı ve ağız boşluğunun sırasıyla 3'lü kombinasyonları SEA analizine tabi tutulmuştur. Her bir parametre değişken olarak tercih edildiğinde diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bulgular bölümünde bu ölçüm sonuçlarına dair grafikler Mesafe (X) – Kontak Kuvveti (Y) eksenel olarak verilmiştir.

Kontak kuvveti denklem 1 ile hesaplanmıştır [14]. Toplam alanı etkileyen parametreler ise kontak çapı, ağız boşluğu olmaktadır.

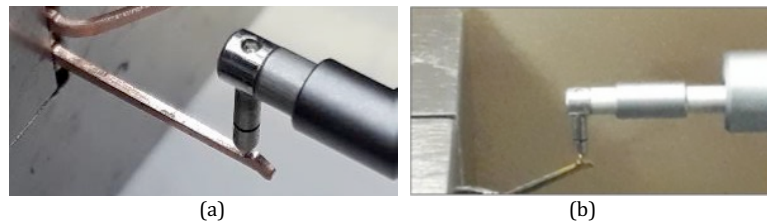
$$F = \frac{P_{av}}{A_t} \quad (1)$$

F : Kontak Kuvveti (N),

Pav : Ortalama Kontak Basıncı (MPa),

At : Toplam Alan (mm²)

Terminalin prototip üretimi esnasında kalıp devrine bağlı üretim sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Üretim için en uygun koşul seçilen 200 baskı sayısı/dk'da terminalin çok adetli ön seri çalışmaları 50.000 adet sonrası sonlandırılmıştır. Buna ek olarak altın kaplama sonrası yapılan Şekil 2'de görselleri verilen ölçümlerde yüzey pürüzlülük uygunluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 2. Yüzey pürüzlülük cihazı ve numunedeki ölçüm yeri: (a) Kaplama öncesi (b) Kaplama sonrası
(Surface roughness measurement device and specimen (a) before coating (b) after coating)

Kalıpta kesme ile üretim sonrası numuneler Taramalı Elektron Mikroskopisi analizlerine gönderilerek PCB takılan bölgenin hassas alanları kontrol edilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) görüntüleri hizmet alımı yapılarak alınmıştır.

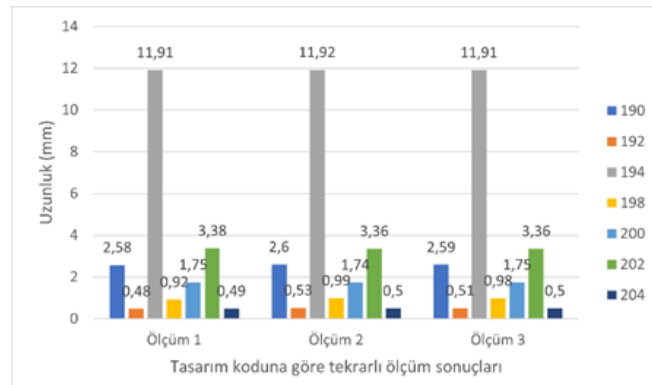
Terminaller firma dışında ilk katman olarak komple nikel ile kaplanmıştır. Ek olarak terminalin ikinci katman olarak bir ucu altın ile kaplanmıştır. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından ince kaplama kalınlıkları Fisherscope X-Ray marka XDV-SDD model cihazı yardımıyla ölçülmüştür.

Altın kaplama sonrası altın tabaka üzerinde oluşan gözenek yoğunluğunun tespiti için DMG yöntemi kullanılmıştır. DMG testi uygulanmasının ardından yüzeydeki gözenekler limitler dahilindedir.

Son olarak kaplanan terminaller bükme kalıbında şekillendirilerek nihai ürün halini almaktadır. Bükme işleminde en uygun seçilen 100 baskı sayısı/dk'da herhangi bir deformasyon gözlenmediği için çalışmanın son aşaması dikkate alınmamıştır.

3. Sonuçlar ve Bulgular (Experimental Results)

Şerit bakır alaşımı CuNiSiP malzeme tercih edilerek 3 farklı tasarım ölçüsü değiştirilerek en uygun tasarımın üretimi gerçekleştirilmiştir. Terminal ürünün progresif kalıplarda hassas metal şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Prototip üretim sonrası malzemenin üzerine Nikel ve Altın kaplama yapılmıştır. Terminal bloku tasarımlarında en kritik nokta PCB takılan bölgenin ağız ölçüsüdür. Hedef değer aralığı çok dar olup istenilen tolerans aralığının yakalanmaması durumunda gerekli işlevselliği yerine getirememektedir. Farklı tasarım parametreleri (Kontak çapı (R), Ağız boşluğu (d)) SEA yöntemi ile incelenerek en uygun form saptanmıştır. Hedef PCB' ye ağız ölçüsünün uygun olduğu tespit edilmiş ve ağız ölçüsünün her üründe belirtilen hata payı içinde olduğu Şekil 3'de yapılan boyutsal ölçümler ile tespit edilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde kalay ve gümüş kaplı bakır alaşımın 40 N yük altında kontak bölgesindeki yük ölçülerek bunun SEA analizi ile doğrulanması yapılmıştır [15].



Şekil 3. Terminal uç, Keyence ve Quickscope kullanarak boyutsal ölçüm sonuçları
(Dimensional measurement results using terminal tip by Keyence and Quickscope)

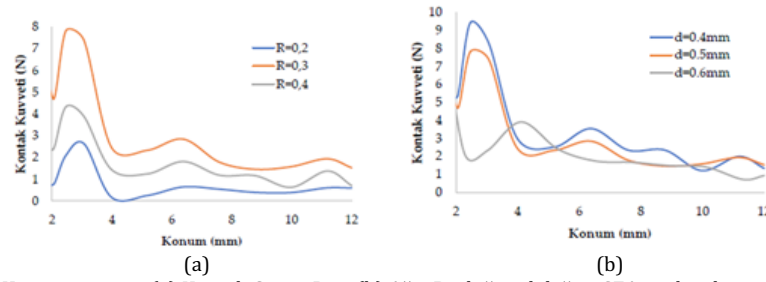
Ölçüm detay referansı sırasıyla 190; 2.6 mm, 192; 0.5 mm, 194; 11.9 mm, 198; 0.95 mm, 200; 1.8 mm, 202; 3.4 mm, 204; 0.5 mm Standart sapma ± 0.10 toleransında tekrarlı ölçüm yapılarak hedeflenen değeri sağladığı görülmüştür. Hassas metal şekillendirmede tasarımı etkileyen faktörler öncelikli olarak pres hızı, kuvvet, malzeme türü, malzeme kalınlığı, malzeme geometrisi ve diğer ortam koşulları gelmektedir. Üretim toleransları, parçanın geometrisine bağlı kontrol amaçlı geliştirilen algoritma sayesinde 0.2 mm ile 0.5 mm arasındaki yer değiştirme limitleri ile zımbanın çalışacağı öngörülmüştür [16]. Bu veriler, proses kontrolünde geometrik toleransların düşük olması gerekliliğini göstermektedir.

Bakır alaşım terminallerin şekillendirilmesi esnasında kontak alanına bağlı farklı kuvvet ve tasarımlar kullanılarak SEA analizleri yapılmıştır [15]. Bu çalışma da ise terminal blok ucu için SEA parametrelerinin değişimleri (Kontak çapı (R), Ağız boşluğu (d)) kullanılarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Terminalin sonlu elemanlar analizi için seçilen parametreler ve ölçüleri
(Selection of parameters and dimensions for finite element analysis of the terminal)

Değişken Parametre No	Ağız Boşluğu-d (mm)	Kontak Çapı-R (mm)
1	0.4	0.2
2	0.5	0.3
3	0.6	0.4

Kontak alanı yarıçapı ile kontak kuvvetinin değişimine ait SEA sonuçları erkek terminalin konumuna göre Şekil 4a'da, terminal ağız boşluğu ile kontak kuvvetinin değişimi erkek terminalin konumuna göre SEA sonuçları Şekil 4b'de verilmiştir.



Şekil 4. Kontak Kuvveti üzerine (a) Kontak Çapı - R ve (b) Ağız Boşluğu - d değeri SEA analiz ölçüm sonucu grafikleri
(On contact force (a) Contact diameter - R over contact force and (b) oral cavity - d value FEA analysis measurement result graphs)

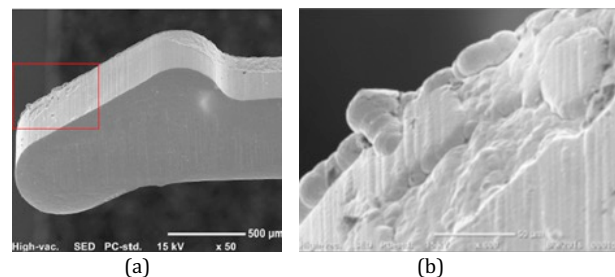
Şekil 4a'da yer alan R değeri 0,3 mm için 7.5 N en yüksek pik değeri elde edilmiştir. Şekil 4b'de ise d değeri 0,5 mm için 7.5 N kontak kuvveti optimum sonucun alındığını göstermektedir. Kontak kuvvetinin kontak alanı ile olan bağıntısı yapılan bir çalışma da SEA analizleri ile gösterilmiş ve kalay-gümüş kaplı (1-5 μm TiN ve 2-6 μm Ag) terminallerin kontak alanları arasındaki ilişki incelenmiştir. Gümüş kaplı bakır alaşımın kontak kuvveti 10 N ve 40 N uygulandığında buna karşılık gelen kontak alanı 0.03 mm² ve 0.07 mm² sırasıyla ölçülmüştür. Kullanılan set-up düzeneği ile kaplamalı fosfor bronz bakır alaşımına kontak kuvveti uygulanmış, temas eden yüzeylerde metalik adhezyona bağlı yüzey pürüzlülüğü görüldüğünü açıklamışlardır [17]. Çalışmamızda tercih edilen kontak alanı düşünüldüğünde SEA ile hesaplanan kontak kuvvetine denk gelen kontak alanı benzerlik göstermektedir.

Terminalin prototip üretimi esnasında kalıp devrine bağlı üretim sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Üretim için en uygun koşul seçilen 200 baskı sayısı/dk için terminalin çok adetli ön seri çalışmaları yapılarak prototip üretim sonrası (50.000 adet) yüzey pürüzlülükleri referans başlangıç üretim olan 200 baskı sayısı/dk ile kıyaslanmıştır. Tüm pürüzlülük ölçümleri 100, 200 ve 300 baskı sayısı/dk için terminalin 5 ayrı bölgesinden yapılmıştır ve ortalamaları Tablo 3'te verilerek 200 baskı/dk sayısı prototip üretim sonrası değerleri kıyaslanmıştır. Buna ek olarak altın kaplama sonrası yapılan ölçümler de yüzey pürüzlülük değeri 0,39-0,66 μm aralığında ölçülmüştür. Devir sayısı artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca adetteki artışa bağlı olarak 200 Prototip üretiminde pürüzlülük değerinin her bölge de aynı devir sayısına kıyasla artış gösterdiği bulunmuştur. Ölçülen değerler yüzey pürüzlülük standartına göre [18] yer alan istenen toleranslar ($R_a < 1.6 \mu\text{m}$) arasında yer almaktadır.

Tablo 3. Terminalin üretim esnasında devir sayısına bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri
(Surface roughness changes depending on the number of revolutions of the terminal during production)

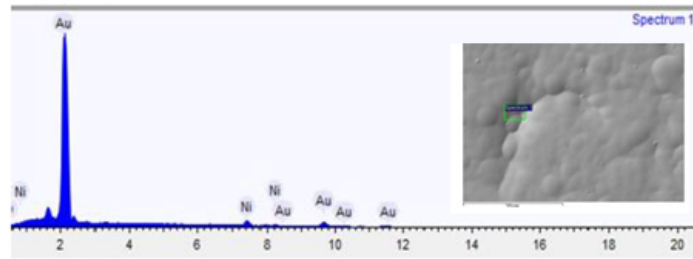
	Devir / dk	100	200	300	200 Prototip
Bölge	Orta 1 (μm)	0,22	0,25	0,33	0,33
	Orta 2 (μm)	0,21	0,24	0,38	0,29
	Orta 3 (μm)	0,18	0,23	0,33	0,25
	Kesme (μm)	0,23	0,19	0,35	0,20
	Kopma (μm)	0,57	0,52	0,49	0,60

Altın kaplama sonrası altın tabaka üzerinde oluşan gözenek yoğunluğunun tespiti yapılmıştır. Standartta [19, 20] belirtildiği şekilde 0,2 mm çapından yüksek olan gözenekler sayılmıştır. Tüm terminallerde 0,2 mm çapından fazla olan gözenek sayısı 25 adet gözenek/cm²'nin altında olduğu görülmüştür. Şekil 5'de ise kalıptan çıkan üründeki terminal blok ezme uçlarındaki üretim sürecine bağlı hassas bölgelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Benzer şekilde bir terminalin birden çok bükme operasyonuna ile üretimi sonrası gerilmeye bağlı yüzeyi karakterize edilmiştir [21].



Şekil 5. Çoklu üretim sonrası terminal ucundaki hassas bölgelerin SEM'de görüntüleme sonrası (a) yüzey ve (b) aşınan bölge
(SEM images of sensitive areas at the terminal tip after production (a) the surface and (b) the wear section)

En uygun sonuç belirlenen ağız boşluğu 0.5 mm ve kontak çapı 0.3 mm terminaller önce ilk katman olarak komple nikel ile kaplanmıştır. İkinci katman olarak terminalin bir ucu altın ile kaplanmıştır. Bunun sebebi elektriksel iletimi arttıran kaplamalar farklılık göstermekle beraber en çok tercih edilen kaplamaların başında altın ve gümüşün gelmesidir. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından kalınlık ölçümlerinin istenen limitlerde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Hedef değerler olan nikel kaplama kalınlığı 1,3-2,5 μm , altın kaplama kalınlığı ise minimum 0,8 μm başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüş ve hedef değerlere ulaşılmıştır. Altın kaplanmış terminalin sahip olduğu Au ve Ni elementi pik dağılımı Şekil 6'de verilmiştir.



Şekil 6. Altın kaplanmış terminale yapılan analiz bölgesi ve SEM-EDS analiz sonucu
(Gold-plated terminal analyses of area and SEM-EDS results)

4. Sonuçlar (Conclusions)

CuNiSiP terminal üretimi ve kaplamasına ait yapılan faaliyetler ve test-analiz hizmetleri neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1-Malzemenin şekillendirme esnasında hassas bölgelerde geometrik değişkenler Keyence-Quickscope ölçümleri ve SEA analizleri ile doğrulanmıştır. Ağız ölçüsü, terminal uzunluğunun toleransları istenen Geometrik toleranslar ± 0.10 mm içinde olduğu ve üretimde herhangi bir engel teşkil etmediği görülmüştür.

2-Kontak kuvvetlerinin yüksek ve buna bağlı muhtemel kontak dirençlerinin düşük olduğu optimum sonuç 0.5 mm ağız ölçüsü ve 0.3 mm kontak çapındaki geometrik tasarıma göre elde edilmiştir.

3-Üretim sonrası kaplama öncesi yüzey pürüzlülük değeri araştırılarak üretim devir hızı belirlenmiştir ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değeri istenen değer limitleri arasındadır. Yüzey pürüzlülük değeri ortalama 0.33 μm olup adhezyona bağlı değişim göstermektedir. Üretim esnasında farklı bölgelerde yüzey pürüzlülüğünün 2-8 μm arttığı görülmüştür. Denemelerdeki artan devir sayısının yüzey pürüzlülük değerini artırdığı ölçülmüştür. Son olarak yüksek adetli üretimlerde yüzey pürüzlülüğün arttığı gözlemlenmiştir.

4-Taramalı Elektron Mikroskopu incelemeleri yapılarak hassas bölgelerde çapak, çatlak oluşumu görülmezken az miktarda aşınan bölgeler tespit edilmiştir.

5-Nikel ve Altın kaplama kalınlığı ve gözenek miktarı istenen limit değerler içinde elde edilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi (Proje No : 3180183) kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Test ve analizlerde yardımını esirgemeyen Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş. birimlerine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] S. Kyeong and M. G. Pecht Ed., *Electrical Connectors Design, Manufacture, Test and Selection*. United Kingdom: Wiley-IEEE

Press, 2021. (Editör)

[2] F. Ossart, S. Noel, D. Alamarguy, S. Correia and P. Gendre, "Electromechanical modelling of multilayer contacts in electrical connectors," in *Proceeding of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 16-19 Sept. 2007, PA, USA [Online]. Available: IEEE Xplore, <http://www.ieee.org>. [Accessed: 10 Dec. 2021].

[3] J. L. Queffelec, N. Ben Jemaa, D. Travers and G. Pethieu, "Materials and contact shape studies for automobile connectors development," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 90-94, March 1991. doi:10.1109/33.76515

[4] A. Monnier, B. Froidurot, C. Jarrige, R. Meyer and P. Testé, "A mechanical, electrical, thermal coupled-field simulation of a sphere-plane electrical contact," in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 26-28 Sept. 2005, Chicago, USA [Online]. Available: IEEE Xplore, <http://www.ieee.org>. [Accessed: 01 Dec. 2021].

[5] R. E. Abdi and N. Benjemaa. "Study of contact resistance for high copper alloys under indentation and insertion forces," *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, vol. 2, no. 2, pp. 75-82, 2008.

[6] P. G. Slade Ed., *Electrical contacts: Principles and Applications*. New York: CRC Press., 1999. (Editör)

[7] R. Zauter and D. V. Kudashov, "Precipitation hardened high copper alloys for connector pins made of wire," *www.citeseerx.ist.psu.edu*, Nov. 29, 2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.601.9158&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed: Nov. 29, 2021].

[8] R. E. Abdi, N. Benjemaa and M. A. Beloufa, "Numerical and experimental studies of automotive connector behaviour," in *Proceeding of the 18th IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, 30 May- 1 June 2007, Montreal, Canada [Online]. Available: actapress, <http://www.actapress.com>. [Accessed: 11 Dec. 2021].

[9] C. I. Ucenic and C. Ratiu, "Applying finite element method (FEM) for solving a self cleaning filtering battery module prototype – Case study," in *Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy and Environment*, 15-17 May 2007, Portoroz, Slovenia [Online]. Available: ACM DL Digital Library, <https://dl.acm.org>. [Accessed: 11 Dec. 2021].

[10] R. E. Abdi, N. Benjemaa and M. A. Beloufa, "Behaviour evolution of automotive connectors," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, no. 2, pp. 151-159, Feb. 2008. doi:10.1243/09544070JAUTO664

[11] G. Villeneuve, D. Kulkarni, P. Bastnagel and D. Berry, "Dynamic finite element analysis simulation of the terminal crimping process," in *Electrical Contacts: Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts*, 1996, pp. 156-172. doi: 10.1109/HOLM.1996.557193.

[12] D. V. Zhmurkin, N. E. Corman, C. D. Copper and R. D. Hilty, "3-Dimensional Numerical Simulation of Open-Barrel Crimping Process," in *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2008, pp. 178-184. doi:10.1109/HOLM.2008.ECP.41.

[13] "Wieland-K76", *wieland.com*, Datasheet, Dec 11, 2021. [Online]. Available: https://www.wieland.com/de/content/download/12513/file/K76_RP_DE.pdf. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[14] R. Holm Ed., *Electric contacts Theory and Application*, Berlin: Springer Verlag, 2000. (Editör)

[15] K. Shimizu, S. Shimada, S. Sawada, Y. Hattori, "Contact Area Analysis by FEM with Plating Layer for Electrical Contact," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E92.C, no. 8, pp. 1013-1019, August 2009. doi:10.1587/transele.E92.C.1013

[16] X. Gong, Y. Feng, Z. W. Ren, J. Cheng, J. R. Tan, "An adaptive design method for understanding tolerance in the precision stamping process," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 16, no. 5, pp. 387-394. doi:10.1631/jzus.A1400220

[17] S. Sawada, K. Shimizu, Y. Hattori, T. Tamai and K. Iida, "Analysis of Contact Resistance Behavior for Electric Contacts with Plating Layer," in *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010, pp. 1-8. doi: 10.1109/HOLM.2010.5619560.

[18] "SAI Global," *infostore.saiglobal.com*, Standards On-Line-SAI Global, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: https://infostore.saiglobal.com/enus/standards/din-en-1990-2010-386091_saig_din_din_877194. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[19] "ASTM Standards," *astm.org*, Standards Online, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/B298.htm>. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[20] "ISO Standards," *iso.org*, TS EN ISO 4524, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: <https://intweb.tse.org.tr>. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[21] B. Jiang, J. Fu, D. Li and L. Ke, "An Advanced Structural Analysis Method for Connector Terminal Based on Multi-step Forming," in *Proceedings of SAE-China Congress 2015: Selected Papers*, 2015, pp. 599-608. doi: 10.1007/978-981-287-978-3_54.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Unit Commitment Problem in Presence of Pumped Storage Hydroelectric Power Plants: The Case of Kahramanmaraş

Fatma Avli Firis^a, Israfıl Karadol^b, Mustafa Sekkeli^c

Submitted: 07.12.2021 Revised: 07.04.2022 Accepted: 07.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.10

ABSTRACT

Keywords: Unit commitment, Electricity distribution, Grid, PF, PDHES

^a Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Institute of Science, Dept. of Electrical and Electronic Engineering
46040 – Kahramanmaraş, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4879-1932

^b Kilis 7 Aralık University, Technical Sciences Vocational School, Dept. of Electrical and Energy
79100 - KILIS, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9239-0565

^c Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Institute of Science, Dept. of Electrical and Electronic Engineering
46040 – KAHRAMANMARAS, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1641-3243

*Corresponding author: fatma.avlifiris@akedasdagitim.com.tr

Anahtar Kelimeler: Birim taahhüt, Elektrik dağıtım, Şebeke, PF, PDHES

In this study, unit commitment problem was investigated on the grid model of a real electricity distribution grid created in the DlgSILENT PowerFactory (PF) program. In this context, the deterministic approach of the mathematical formulation unit commitment problem used in the PF program was introduced. The electricity distribution grid of Kahramanmaraş province was modeled on PF and a pumped-storage hydroelectric power plant (PHPP) was integrated into this modeling. The working logic of PHPP is based on the fact that it can be used to store or sell energy according to changes in electrical energy prices. With this model, while the power plant is expected to supply the peak load demands of the consumers in the grid, it was also aimed to gain economic profit by taking advantage of the price changes in the electricity markets. Modeling and analysis studies in line with these targets concluded that energy storage technologies, which use high power effectively, are beneficial both technically and economically.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerinin Varlığında Birim Taahhüt Probleminin İncelenmesi: Kahramanmaraş Örneği

ÖZ

Bu çalışmada birim taahhüt problemi, gerçek bir elektrik dağıtım şebekesinin DlgSILENT PowerFactory (PF) programında oluşturulmuş şebeke modeli üzerinde incelenmiştir. Bu kapsamda, PF programında kullanılan birim taahhüt problemi matematiksel formülasyonun deterministik yaklaşımı tanıtılmıştır. Kahramanmaraş ilinin elektrik dağıtım şebekesi PF üzerinde modellenmiş ve bu modellemeye pompaj depolamalı hidroelektrik santrali (PDHES) entegre edilmiştir. PDHES'in çalışma mantığı, elektrik enerjisi fiyatlarındaki değişikliklere göre enerji depolama ya da enerji satma işlemi yapacak şekilde kullanılabilmesine dayanmaktadır. Bu model ile santralin şebekedeki tüketicilerin pik yük taleplerini karşılaması beklenirken, elektrik piyasalarındaki fiyat değişimlerinden de yararlanılarak ekonomik kazanç sağlanması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda yürütülen modelleme ve analiz çalışmaları, yüksek gücü etkin kullanan enerji depolama teknolojilerinin hem teknik hem de ekonomik açıdan faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

1. Giriş (Introduction)

Elektrik güç sistemlerinde tüketim talepleri insana ait faaliyetlerin yerine getirilmesinden dolayı günlük, haftalık, aylık ve yıllık zaman periyotlarında değişkenlik göstermektedir [1]–[4]. Tüketim talepleri genellikle endüstriyel yüklerin fazla olduğu puant zaman dilimlerinde yüksek düzeyde iken insanların uyumakta oldukları gecenin geç saatleri ve sabahın erken saatlerinde düşük düzeydedir [5]. Elektrik güç sistemlerindeki arz-talep dengesinin karşılayabilmesi için yeterli düzeyde üretim biriminin taahhüt edilmesi gerekmektedir [6].

Birim taahhüt, belirlenmiş bir süre boyunca güç sisteminin her bir üretim birimi için döner rezerv (bir ünitenin sistem yük talebinin ani artması veya üretim sisteminde başka bir ünitenin devre dışı olması durumunda birkaç saniye içinde sisteme yük verebilecek durumda hazır tutulması) kısıtlamalarına ve belirli bir yük tahminine bağlı olarak optimum bir program ve bir üretim seviyesi bulma görevinin üstlenilmesidir [7, 8]. Amaç, enerji üretimi ve enerji üretim maliyetlerini optimize ederek arz-talep dengesinin sağlanmasıdır [9].

Birim taahhüt problemi, elektrik güç sistemlerindeki en önemli ve en kritik konulardan biridir ve 1940'lardan bu yana araştırmacılar tarafından yaygın olarak ele alınan bir durumdur [10]. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının artan katılımına ilaveten enerji depolama cihazlarının uygulamasının da artmasıyla güç sistemlerinin işletim stratejisinde de önemli değişikliklere gidildiği bilinmektedir [11]. Kronolojik anlamda bakıldığında; 1940'lı yıllarda elektrik güç sistemlerinde birim taahhüt problemi ilk olarak ortaya çıkmıştır. 1962 yılında birim taahhüt problemi için ilk karışık tamsayı programlama formülasyonunun oluşturulmasıyla ivme kazanan süreç, 1977 yılında birim taahhüt probleminin belirsizliğiyle başa çıkmak için stokastik programlama uygulamasına ait ilk girişim ile ilerlemiştir. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise güç sistemleri sektöründe elektrik üretimi pazar odaklı bir hale gelmiştir. Bu alandaki birim taahhüt çalışmaları 2000'li yıllara gelindiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemine etkisi ve entegrasyonuna çözüm üretecek olan az sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. 2010'lu yıllardan itibaren ise kesintili yenilenebilir enerjinin varlığında birim taahhüt probleminin son yaklaşımları çalışılmıştır [12].

Bu kapsamda yapılan literatür taramasında bazı çalışmaların öne çıktığı görülmüştür. España ve arkadaşları, termik kaynaklara dayalı elektrik güç şebekesindeki birim taahhüt probleminin modellenmesi için karmaşık tamsayılı lineer programlama önermiştir. Çalışma ile edinilen deneysel sonuçlar farklı aralıklarda üretim birimlerinden oluşan güç sistemleri üzerinde test edilmiş ve literatürde kabul edilen diğer çalışmalardan daha etkili sonuçlar elde edildiği görülmüştür [13]. Pandžić ve arkadaşları, rüzgar enerji santrallerinin büyük ölçekli şebeke entegrasyonları ile meydana gelen dalgalanmaların belirsizliği gölgesinde birim taahhüt problemini ele almışlar ve geliştirmiş oldukları senaryo tabanlı stokastik yaklaşım çalışması ile birim taahhüt problemini çözmeye çalışmışlardır. Çalışma kapsamında önerilen metodun mevcut metodlara kıyasla maliyet ve hesaplama süresi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [14]. Schulze ve Mckinnon, yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonunun giderek artış göstermesiyle gereksinim duyulan birim taahhüt için WILMAR senaryo oluşturma tekniğini kullanarak stokastik programlama metodu üzerinde çalışmışlardır. Birim taahhüt problemlerinde kullanılan stokastik yaklaşımın, deterministik yaklaşıma kıyasla üretim maliyetlerini yüzde üç oranında azalttığı görülmüştür [15]. Yang ve arkadaşları, birim taahhüt problemi için yeni bir; ikili değişkenli karmaşık tamsayılı programlama formülasyonu sunmuşlardır. Bu kapsamda geliştirilen modelin daha az kısıt içerdiği, kompakt yapıda olduğu ve problem verimli şekilde çözüme ulaştırdığı görülmüştür [16]. Hickman ve arkadaşları, hidroelektrik kaynak içeren entegre elektrik güç sistemlerinin üretim, tüketim ve dağıtım yapılarında zorlu bir problem olan birim taahhüt konusunda enerji-su bağlamında yeni bir formülasyon geliştirmiştir. Formüle edilen birim taahhüt probleminin, enerji-su sistemlerine uygulanabilirliği ve ekonomik faydalarının olabileceği görülmüştür [17]. Sam'ın ve arkadaşları, güneş enerji santrallerini içeren akıllı şebekede birim taahhüt problemi belirsizliğinin çözümü için karınca aslanı optimizasyonunu kullanmışlardır. Önerilen algoritma ile, güneş enerjisine dayalı santrallerin birim taahhüt planlamasına entegre edilmesiyle toplam işletme maliyetinin önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür [18]. Sakthi ve arkadaşları geleneksel üretimlere dayalı santrallerin beraberinde rüzgar enerji santrallerinin de bulunduğu bir güç sisteminde birim taahhüt problemini gri kurt algoritmasıyla çözmeye çalışmışlardır. Edinilen sonuçlara göre algoritmanın ekonomik çözümler minvalinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [19].

Yapılan literatür taramasında birim taahhüt problemine çeşitli metodolojilerle çözümler aranmıştır. Güç sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının seçimi, tasarımı, bu kaynakların güç şebekesine etkilerinin neler olabileceğinin simüle edilmesi gibi amaçlara hizmet eden çeşitli bilgisayar programları ve modelleri geliştirilmiştir. Ancak bu programlar yardımıyla birim taahhüt problemini ele alan çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür. Bu platformda yer alan DİGSILENT Power Factory (PF); yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama, şebeke gibi çok kaynaklı enerji tesislerinin incelenmesine, modellenmesine ve analizine dayalı bir simülasyon ve optimizasyon yazılımıdır [20].

Bu makalede, birim taahhüt probleminin PF programı vasıtasıyla incelenmesi konusu işlenmiştir. Bu çalışmanın literatürde yer alan diğer çalışmalardan farkları;

- Birim taahhüt problemi, PF programı yardımıyla ve gerçek bir elektrik dağıtım şebekesi (Kahramanmaraş bölgesi) envanteri üzerinde gerçekleştirilmiştir.
- Reel şebeke üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji kaynaklarının) bulunması birim taahhütlerine göre şebeke işletim analizleri yapılmıştır.
- Reel şebekede, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji kaynaklarının) ve PDHES bulunması durumunda birim taahhütlerine göre şebeke işletim analizleri yapılmıştır.

Bu çalışma, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde birim taahhüt kavramı ve gerekliliği tanıtılarak bu alandaki literatürde yer alan çalışmalar anlatılmıştır. İkinci bölümde birim taahhüt probleminin ele alındığı PF programında birim taahhüt problemi deterministik yöntemle çözüldüğü için birim taahhüt probleminin deterministik formülasyonları sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde PF programı üzerinde modellemeye kullanılacak ekipmanlar tanıtılmış ve modellemeye uygulama şekilleri aktarılmıştır. Üçüncü bölümde PF programı ile modellenen şebekede; mevcut ekipmanların beraberinde üretim santrallerinin bulunmaması durumunda, bulunması durumunda ve hem üretim santrallerinin hem de PDHES'in bulunması durumunda elde edilen şebeke işletim analizleri gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde ise, edinilen analizlerin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Birim taahhüt probleminin deterministik formülasyonu (Deterministic formulation of the unit commitment problem)

Matematiksel olarak birim taahhüt problemi; genellikle büyük ölçekli olup konveks olmayan yapıdadır ve karışık tam sayılı lineer olmayan optimizasyon problemi olarak formüle edilebilmektedir [21]. Problemin konveks olmama özelliği üretim biriminin ikili yapısından (açık veya kapalı olma durumu) kaynaklanmakta iken lineer olmama özelliği üretim maliyet eğrilerinin ve iletim kısıtlamalarının doğrusal olmayan yapısından kaynaklanmaktadır [22].

Birim taahhüt problemindeki doğrusal olmayan ve ikili yapıdaki (konveks olmayan) değişkenlerin kombinasyonunun varlığı, problemin karışık tam sayılı programlama ile kombinatoriyal optimizasyon problemi olarak formüle edilmesini gerektirmektedir [23], [24]. Bu formülasyonlar, hem birim taahhütün temel yönleri olan üretim birimlerinin operasyonel sınırlarını hem de üretimin tüketim talebini karşılaması esaslarını kapsamaktadır [22]. Deterministik formülasyonların analitik ifadeleri, aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir [21]:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (c_j(p_j(t)) + c_j^U y_j(t)) \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in J} p_j(t) = D(t) \quad \forall t \in T \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} \bar{p}_j(t) \geq D(t) + R(t) \quad \forall t \in T \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.3'te yer alan T değeri tüm zaman kümesini (24 saatlik zaman dilimini), t değeri ise tek bir zamanı ifade etmektedir. Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2'de yer alan $p_j(t)$ değeri, birim j tarafından t anında üretilen elektrik miktarını ifade etmektedir. Eşitlik 2.1'de yer alan c_j^U değeri t zamanının da j biriminin başlangıç maliyetini ifade etmektedir. Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3'te yer alan D(t) saatlik yük tahminini, Eşitlik 2.3'te yer alan R(t) ise yedek güç gereksinimini ifade etmekte olup sistem işleticisi tarafından önceden belirlenmiştir.

$$v_j(t-1) - v_j(t) + y_j(t) - z_j(t) = 0 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'te görüldüğü gibi; her üretim birimi başına v_j , y_j ve z_j olmak üzere üç değişken tanımlanmaktadır. Buna göre j ünitesi belirlenen t zaman aralığında devredeyse $v_j(t)$ 1'e eşit, devrede değilse 0 olarak kabul edilmiştir. Diğer bir durumda; j ünitesi belirlenen t zaman aralığının başlangıcında devreye alınırsa $y_j(t)$ 1'e eşit, aksi durumda 0 olarak kabul edilmektedir. Son olarak z ünitesi belirlenen t zaman aralığının başlangıcında devrede değilse $z_j(t)$ 1 olarak, aksi durumda 0 alınmıştır.

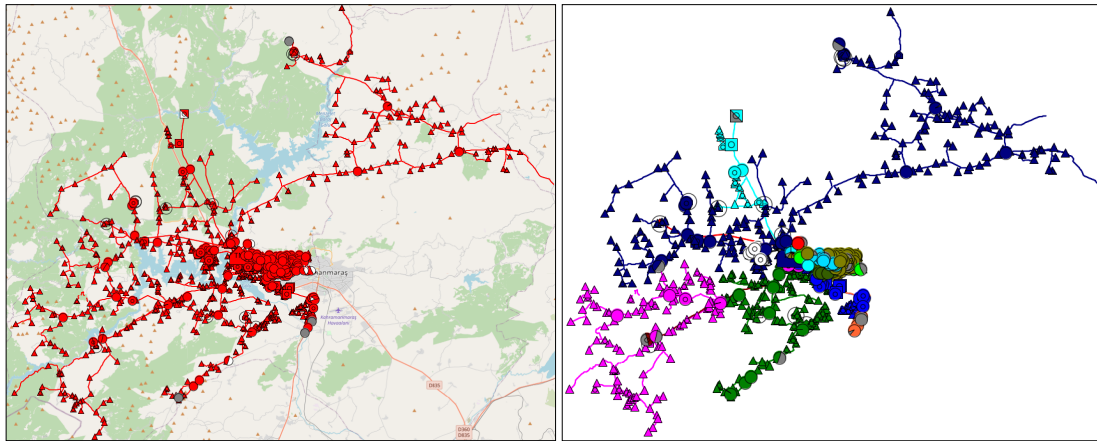
$$\underline{P}_j v_j(t) \leq p_j(t) \leq \bar{p}_j(t) \leq \bar{P}_j v_j(t) \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.5)$$

Bir üretim birimi belirlenen t zaman aralığında devredeyse güç çıkışı $\underline{P}_j(j)$ ve $\bar{P}_j$ olarak ifade edilen alt ve üst güç limitleri sağlamalıdır. Bu gereklilik Eşitlik 2.5 ile ifade edilmektedir. Ayrıca j biriminden t zaman aralığında elde edilebilecek maksimum gücün limitlerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

2.2. DlgSILENT PowerFactory modellemesi (Modeling with DlgSILENT PowerFactory)

DlgSILENT "Digital Simulation of Electrical Networks" kelimelerinin kısaltılmış hali olup iletim, dağıtım ve endüstriyel elektrik sistemlerinin analizi için kullanılan ve bu sistemlerin planlanıp işletilmesinde optimizasyon hedeflerine ulaşmak için geliştirilmiş bir programdır. Bu program vasıtasıyla elde edilen sonuçların geçerliliği ve doğruluğu dünya çapında güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesi ile ilgili kuruluşlar tarafından onaylanmıştır [25].

Kahramanmaraş ilinin elektrik dağıtım hizmetini üstlenen AKEDAŞ Elektrik Dağıtım Şirketi'nin coğrafi bilgi sistemi, Python ve DlgSILENT Programlama Dili kodları yardımıyla DlgSILENT PowerFactory programında oluşturulmuş olan AKEDAŞ orta gerilim şebekesinin modeli, bu çalışma kapsamında tek bir transformatör merkezine indirgenmiştir. DlgSILENT PowerFactory programında oluşturulmuş bu transformatör merkezinin coğrafi ve powerfactory modeli Şekil 1'de verilmektedir.



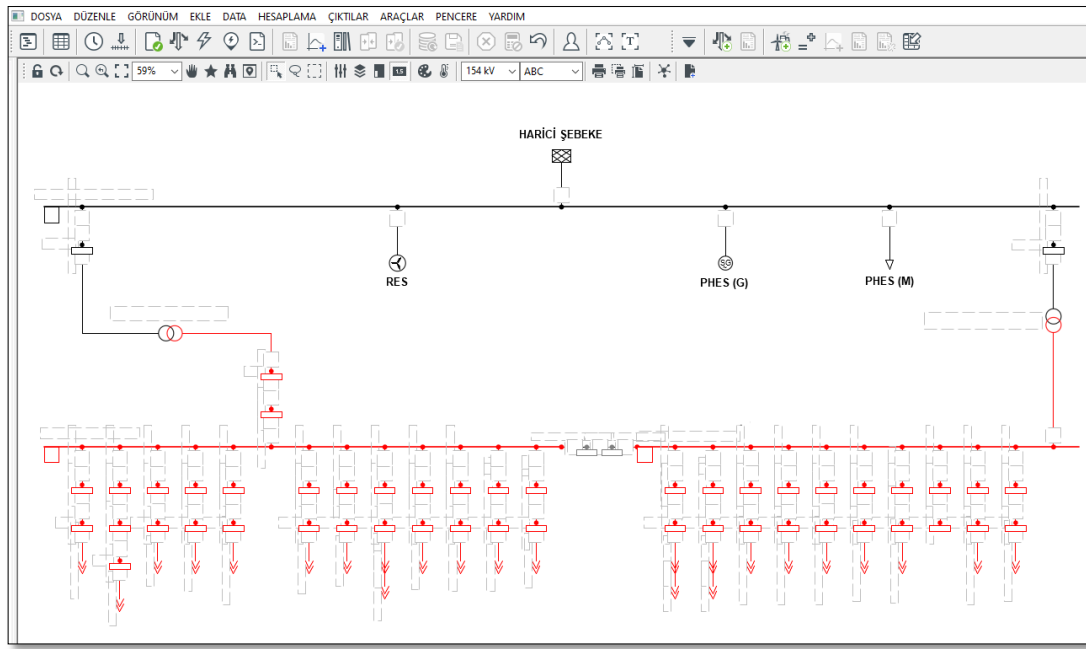
Şekil 1. Coğrafi ve PowerFactory model görünümü (Views of geographic and PowerFactory model)

Modelleme ve analiz çalışmalarının gerçekleştirildiği AKEDAŞ elektrik dağıtım şebekesi içerisinde yer alan transformatör merkezine ait şebeke envanterleri Tablo 1'de verilmiştir. Transformatör merkezinin yenilenebilir enerji santralleri haricinde kurulu gücü 648.15 MVA olup 1028.280 km uzunluğunda havai hat, 293.684 km uzunluğunda yeraltı iletkeni bulundurmaktadır.

Table 1. Transformatör merkezi üzerindeki ekipmanların elektriksel parametreleri
(Electrical parameters of equipment on transformer substation)

Malzeme	Tip	Adet	Malzeme	Tip	Adet
Transformatör	154/31.5 kV_100 MVA	2	Statik Senkron Generatör	154 kV_20 MVA	1
Transformatör	31.5/6.3 kV_4.1 MVA	1	Senkron Motor	154 kV_20 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_25 MVA	1	Senkron Generatör	154 kV_20 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_7.1 MVA	1	Senkron Generatör	31.5 kV_54 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_3.75 MVA	1	Senkron Generatör	31.5 kV_13.9 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_3.6 MVA	1	Senkron Generatör	31.5 kV_4.8 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_3.2 MVA	1	Senkron Generatör	31.5 kV_1.2 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_2.5 MVA	18	Senkron Generatör	31.5 kV_0.8 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_2 MVA	17	Senkron Generatör	0.4 kV_7.1 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_1.6 MVA	23	Senkron Generatör	0.4 kV_0.4 MVA	1
Transformatör	31.5/0.4 kV_1.25 MVA	23			
Transformatör	31.5/0.4 kV_1 MVA	75			
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.9 MVA	1	Malzeme	Tip	Uzunluk
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.8 MVA	8	Havai Hat İletkeni	Swallow_31.5 kV	621.080
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.63 MVA	104	Havai Hat İletkeni	Raven_31.5 kV	62.576
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.5 MVA	1	Havai Hat İletkeni	Pigeon_31.5 kV	188.273
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.4 MVA	114	Havai Hat İletkeni	Partridge_31.5 kV	103.203
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.315 MVA	1	Havai Hat İletkeni	Hawk_31.5 kV	53.148
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.3 MVA	1	Yer Altı Kablosu	Cu_240_31.5 kV	26.254
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.25 MVA	70	Yer Altı Kablosu	Cu_185_31.5 kV	0.123
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.16 MVA	85	Yer Altı Kablosu	Cu_150_31.5 kV	8.751
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.1 MVA	189	Yer Altı Kablosu	Cu_120_31.5 kV	0.262
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.063 MVA	2	Yer Altı Kablosu	Cu_095_31.5 kV	128.602
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.05 MVA	225	Yer Altı Kablosu	Cu_050_31.5 kV	26.148
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.04 MVA	5	Yer Altı Kablosu	Cu_035_31.5 kV	5.898
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.025 MVA	28	Yer Altı Kablosu	Al_400_31.5 kV	45.545
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.015 MVA	1	Yer Altı Kablosu	Al_150_31.5 kV	44.532
Transformatör	31.5/0.4 kV_0.01 MVA	2	Yer Altı Kablosu	Al_095_31.5 kV	7.954
			Yer Altı Kablosu	Al_070_31.5 kV	0.573

Transformatör merkezinde bulunan değişken ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu gücü 85.4 MW olup bu kaynaklardan 17 adeti 10.5 MW kurulu güç ile güneş enerji santrali, 3 adeti 74.9 MW kurulu güç ile hidroelektrik santralidir. Bu kaynaklara ilaveten şebeke modeline 20 MW kurulu gücünde pompaj depolamalı hidroelektrik santral (PDHES) ve modellemede incelenecek birim taahhüdü daha belirgin bir şekilde izleyebilmek adına 20 MW kurulu gücünde rüzgâr enerji santrali (RES) de eklenmiştir. Eklenen teçhizatlarla DlgSILENT PowerFactory programında oluşturulan modelin tek hat şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Modelleme tek hat şeması (Modeling single-line diagram)

DigSILENT PowerFactory'nin üretim planlaması (UC) modülü kullanıcının piyasa simülasyonunu harici bir araca gerek olmadan yapılmasını sağlamaktadır. Üretim planlaması, lineer programlama problemini, üretim santrallerinin çalışma noktasını ve toplam işletme maliyetlerini en aza indirecek şekilde önceden tanımlanmış belli bir zaman dilimi için optimize etmektedir.

2.3. Modellemenin uygulaması (Application of modeling)

DigSILENT PowerFactory programında oluşturulan model üzerinde yer alan şebeke bileşenlerinin her birine zamana bağlı yük karakteristiği atanarak kontroller, kısıtlar ve işletme maliyetleri girilmiştir. Saatlik zaman dilimlerinde bir günlük periyotta olacak şekilde modelleme çalıştırılmıştır. Modellemede kullanılan harici şebeke, pompaj depolamalı hidroelektrik santral, güneş enerji santrali, rüzgâr enerji santrali, nehir tipi hidroelektrik santrali ve genel yüklerin teknik özellikleri alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.3.1. Harici şebeke (External grid)

Modellemede tanımlanan harici şebeke, enerji temininin kesintisiz bir şekilde sağlanabilmesi adına dağıtım şebekesinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi temin eden, aynı zamanda şebekede üretilen ihtiyaç fazlası enerjiyi kabul eden ekipman olarak rol oynamaktadır. Aynı suretle, temin edilecek ya da kabul edilecek enerjinin miktarına müdahale edilmemiş, aktif güç limitlerine 1000 MW'lık sınır konulmuştur.

Günün her saatinde enerji teminine ya da alımına uygun konumda olacağından zamana bağlı yük karakteristiği tanımlanmamıştır. İşletme maliyeti ise Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından belirlenmiş ve 01.10.2021 tarihinden itibaren geçerli güncel elektrik fiyatı olan 0.916 TL/kWh olarak kabul edilmiştir.

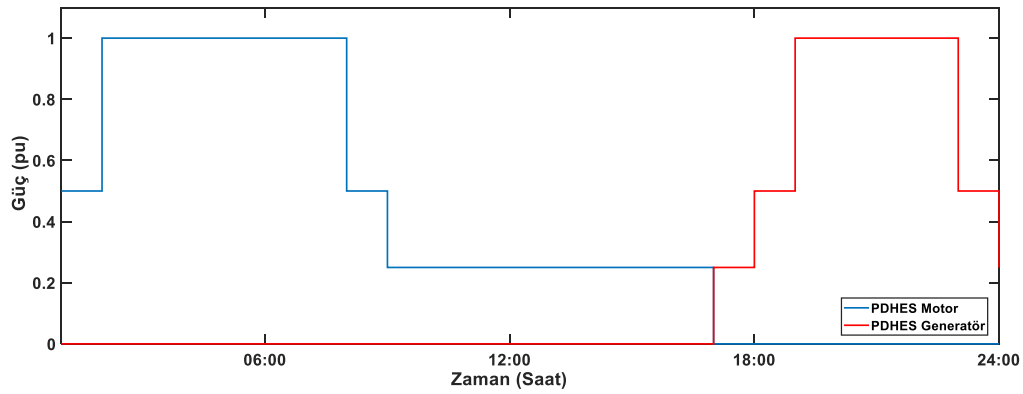
2.3.2. Pompaj depolamalı hidroelektrik santral (Hydroelectric power plant with pumped storage)

Modellemede tanımlanan PDHES, şebekenin depolama ekipmanı olarak görev yapmaktadır. PDHES, elektrik talebinin ve dolayısıyla fiyatların düşük olduğu saatlerde motor modunda çalışıp enerji kullanarak ve alt haznesindeki suyu üst haznesine aktararak suyun potansiyel enerjisini depolamaktadır. Elektrik talebinin ve fiyatların yüksek olduğu saatlerde ise tesis generatör modunda çalışarak üst haznesindeki suyu alt hazneye doğru bırakarak elektrik enerjisi üretmektedir. Böylece hem pik talebin karşılanması sağlanacak, hem de elektrik fiyatlarının ucuz olduğu saatlerde satın almış olduğu enerjiyi, dağıtım şebeke işletmecisiyle yapabileceği ikili anlaşmalarla belirli fiyattan satarak kar marjı oluşturabilecektir.

Modellemede birim taahhüt çalışmasını daha belirgin bir şekilde inceleyebilmek adına pompaj depolamalı hidroelektrik santralin aktif gücü, bölgedeki yenilenebilir enerji santrallerinin yaklaşık olarak çeyrek dilimi oluşturacak şekilde 20 MW ile sınırlandırılmış ve işletme maliyeti harici şebeke maliyetinin ortalama yarısı olacak şekilde 0,500 TL/kWh olarak kabul edilmiştir.

PDHES motor modunda, elektrik fiyatlarının ve enerji ihtiyacının en düşük olduğu saatlerde enerji depolamak için elektrik tüketimi gerçekleştirecektir. 00:00'da yarım kapasiteyle devreye girip 01:00-06:00 saatleri arasında tam kapasite, 07:00'da yarım kapasite, 08:00-09:00 saatlerinde ise çeyrek kapasite olarak motor modunda çalışıp harici şebekeden enerji satın alacaktır. Böylece 00:00-09:00 saatleri arasında kademeli olarak toplamda 7.5 tam kapasite tüketim gerçekleştirilerek depolama işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır.

PDHES generatör modunda, elektrik fiyatlarının ve enerji ihtiyacının en yüksek olduğu saatlerde ise üretim gerçekleştirecektir. 16:00'da çeyrek kapasiteyle devreye girip 17:00'da yarım kapasite, 18:00-21:00 saatlerinde tam kapasite, 22:00'da yarım kapasite ve 23:00'da çeyrek kapasite üretim sağlayarak kademeli bir şekilde toplamda 5.5 saatlik tam kapasite üretim gerçekleştirilmiş olacak, 16:00 ile 23:00 saatleri arasında dağıtım şebekesine enerji temini sağlanmış olacaktır. PDHES'in motor ve generatör modlarında çalışma durumları Şekil 3'te gösterilmiştir.

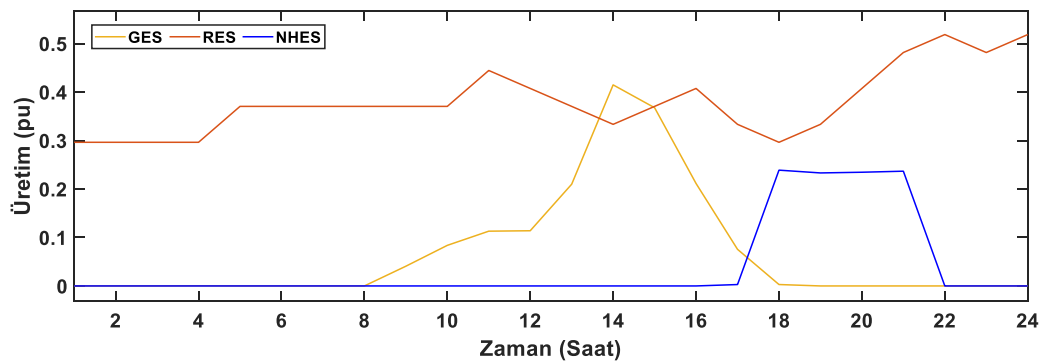


Şekil 3. PDHES motor ve generatör çalışma durumları (PDHES engine and generator working states)

2.3.3. Güneş, rüzgar ve generatör çalışma durumları (Solar, wind and hydroelectric power plants)

Elektrik dağıtım şebekesine entegre halde bulunan güneş enerji santralleri (GES), nehir tipi hidroelektrik santralleri (NHES) ve modellemeye dahil edilen rüzgar enerji santralleri (RES), programda da değişken yenilenebilir enerji kaynağı olarak seçildiğinden işletme maliyeti girilmemiştir.

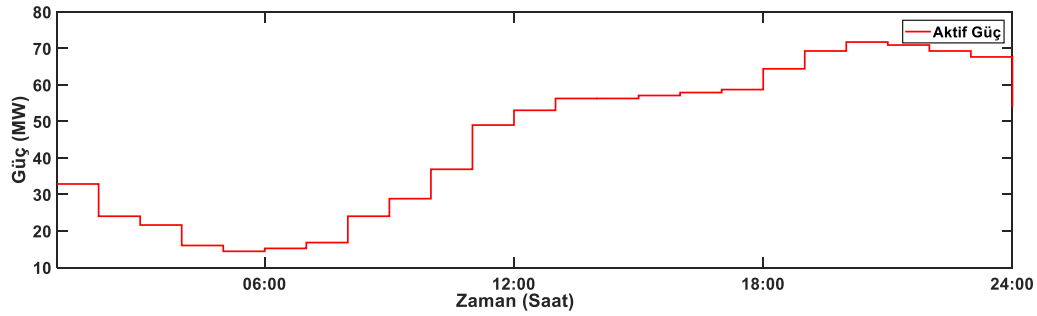
Şebekede mevcut halde bulunan güneş ve hidroelektrik santrallerinin üretim karakteristikleri elektrik dağıtım şebekesinde uzaktan sayaç okuma sisteminden alınarak oluşturulmuş ve modellemeye işlenmiştir. Modellemeye sonradan dâhil edilen rüzgâr enerji santralının üretim karakteristiği ise Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.'nin şeffaflık platformundan, çalışılan tarihteki bir günlük enerji üretim verileri alınarak oluşturulmuş ve modellemeye işlenmiştir. Modelleme kapsamında dağıtım şebekesinden seçilen bir güneş enerji santralının, nehir tipi hidroelektrik santralin ve rüzgâr enerji santralının üretim karakteristikleri Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. GES, RES ve HES üretim karakteristikleri (GES, RES and HES production characteristics)

2.3.4. Genel yükler (General loads)

Modelleme kapsamında, elektrik dağıtım şebekesinde mevcut halde bulunan genel yüklerin tüketim karakteristikleri, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.'nin şeffaflık platformundan, çalışılan tarihteki bir günlük enerji tüketim verileri alınarak oluşturulmuş ve modellemeye işlenmiştir. Şekil 5'te dağıtım şebekesi yüklerinin bir günlük tüketim karakteristiği görülmektedir.



Şekil 4. Genel yük tüketim karakteristiği (General load consumption characteristics)

3. Bulgular ve Tartışma (Findings And Discussion)

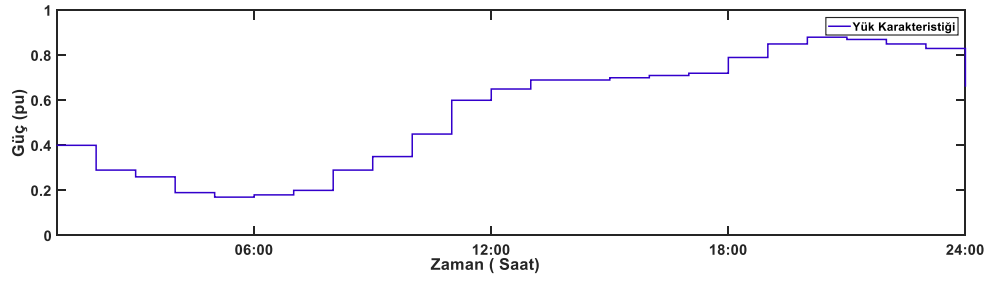
Elektrik güç sistemleri alanı; elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması gibi farklı aşamalarda çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu alandaki temel sorunlar; elektrik tüketim talebinin değişkenliği, elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımına bağlı çevre sorunları, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin kesintili olması ve genel itibarıyla sistem bileşenlerinin arızalanması olarak sıralanabilmektedir. Sayılan zorlukların yanı sıra güç sistemlerindeki en önemli ve en kritik konulardan biri olan birim taahhüt problemidir. Birim taahhüt problemi, elektrik piyasalarında güç sistem işletilmesi temel kararlarının ele alınmasıdır. Bir diğer ifadeyle güç sistemlerinde elektrik enerjisine duyulan talebin minimum maliyetle karşılanabilmesi adına sistemdeki her bir üretim birimi için güç üretiminin programının belirlenmesidir.

Son yıllarda özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından daha yüksek üretimin elde edilmesi, bu kaynakların yüksek değişkenliği ve öngörülemezliğinin yanı sıra elektrik piyasalarında fiyata duyarlı talep tarafı katılımının artması nedeniyle birim taahhüt sorunu zorlu bir sorun haline gelmiştir. Bu noktada, artan gerçek zamanlı belirsizliğin sistem güvenilirliği tarafını güvence altına alarak sağlam birim taahhüt kararları üreten etkin bir metodolojiye sahip olmak, zorunlu hale gelmiştir.

DİGSILENT PowerFactory programında oluşturulan model üzerinde tanımlanıp yük ve üretim karakteristikleri tanımlanmış olan şebeke ekipmanlarıyla; günlük periyotta ve senaryo bazlı olacak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar;

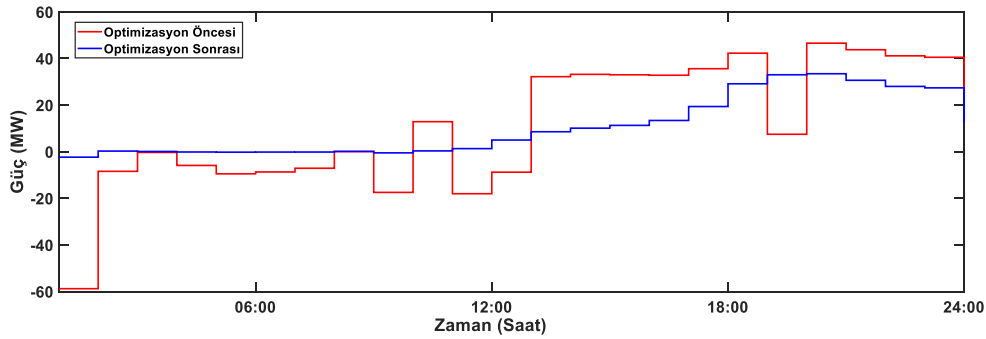
- Dağıtım şebekesinde üretim santrallerinin ve depolamanın devrede olmadığı, sadece tüketimlerin devrede olduğu durumda optimizasyon öncesi ve sonrası aktif güç değişimleri,
- Dağıtım şebekesinde üretim santrallerinin ve tüketimlerin devrede olduğu, depolamanın devrede olmadığı durumda optimizasyon öncesi ve sonrası aktif güç değişimleri,
- Dağıtım şebekesinde üretim santrallerinin, tüketimlerin ve depolamanın devrede olduğu durumda optimizasyon öncesi ve sonrası aktif güç değişimleri şeklinde belirlenmiştir.

Üretim santrallerinin ve depolamanın bulunmadığı senaryoda, elektrik dağıtım şebekesinde herhangi bir üretim kaynağı ya da depolama donanımı dolayı optimizasyon öncesi ve sonrası aktif güç değişimlerinde herhangi bir fark bulunmamakta, her iki durumda da Şekil 6'da yer alan grafik görülmektedir. Grafik, aynı zamanda şebekedeki yüklerin saatlik bazda ihtiyacı olan ve harici şebekeden çekilen enerjiyi ifade etmektedir. Bu enerji puant zaman diliminde maksimum seviyelerde iken saat 04:00 -08:00 aralığında minimum seviyededir. Bu durum gün içerisindeki enerji arzındaki değişkenliği göstermektedir.



Şekil 6. Dağıtım şebekesinin güç karakteristiği (Power characteristic of distribution grid)

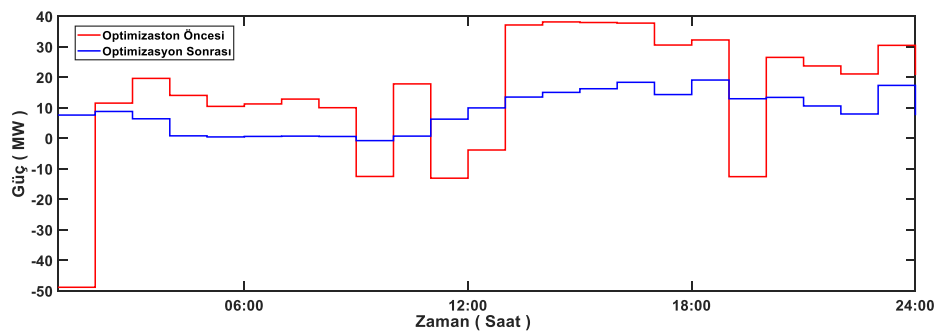
Üretim santrallerinin bulunup depolamanın bulunmadığı senaryoda elektrik dağıtım şebekesinde entegre halde bulunan üretim santrallerinin PF aracılığıyla birim taahhüt problemi çözülmüştür. Böylece dağıtım şebekesi içerisindeki üretim planlaması doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Enerjinin şebeke içerisinde dağıtımını optimize edilerek harici şebekeden satın alınan ve harici şebekeye satılan enerji miktarı azaltılmıştır. Şekil 7’de optimizasyon öncesinde ve sonrasında dağıtım şebekesinin güç karakteristiği verilmiştir.



Şekil 7. Dağıtım şebekesinin güç karakteristiği (Power characteristic of distribution grid)

Bu senaryoya göre; optimizasyon öncesi şebekenin minimum ve maksimum gerilim değerleri sırasıyla -58.78 MW ve 46.57 MW’tır. Optimizasyon sonrasında ise şebekenin minimum ve maksimum gerilim değerleri sırasıyla -2.33 MW ve 33.46 MW’tır. Şebeke karakteristiğinin standart sapması optimizasyon öncesinde 27.00 iken optimizasyon sonrasında 12.76 değerine kadar düşmüştür. Optimizasyon sonrasında öncesine kıyasla standart sapmada %52.74 azalma gerçekleşmiştir. Şebeke sistemlerindeki büyük miktarda enerji değişkenliği şebeke esnekliğini ve güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Optimizasyon sonuçlarında elde edilen sonuçlara göre şebeke değişkenliği mevcut duruma göre azalmış ve bu durum şebeke işletesi açısından büyük avantajlar sağlamaktadır.

Üretim santrallerinin ve depolamanın bulunduğu senaryo, elektrik dağıtım şebekesinde entegre halde bulunan üretim santrallerinin olduğu gibi kabul edilmesi ve şebekeye pompaj depolamalı hidroelektrik santralin eklenmesi ile oluşturulmuştur. Buradaki pompaj depolamalı hidroelektrik santralin çalışma mantığı, elektrik enerjisi fiyatlarındaki saatlik değişikliklere göre enerji depolama ya da enerji satma işlemi yapacak şekilde kullanılabilmesi mantığına dayanmaktadır. Bu kapsamda, PF yardımıyla birim taahhüt problemi çözülmüş ve şebeke içerisindeki üretim planlaması doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Dağıtım şebekesinin optimizasyon öncesinde ve sonrasında aktif güçlerinin değişimleri Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Dağıtım şebekesinin güç karakteristiği (Power characteristic of distribution grid)

Bu senaryoya göre; optimizasyon öncesinde şebekenin minimum ve maksimum gerilim değerleri sırasıyla -48.74 MW ve 38.19 MW'tır. Optimizasyon sonrasında ise şebekenin minimum ve maksimum gerilim değerleri sırasıyla 0.71 MW ve 19.14 MW'tır. Şebeke karakteristiğinin standart sapması optimizasyon öncesinde 20.81 iken optimizasyon sonrası 6.48 değerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu durumda optimizasyon öncesi duruma göre standart sapmada %68.86 oranında bir iyileşme gerçekleşmiştir.

Çalışmaya elektrik dağıtım şebekesinin enerji tedarik sürekliliği perspektifinden bakıldığında; şebekedeki mevcut ve kesintili üretim santrallerinin yanı sıra şebekeye entegre edilecek pompaj depolamalı hidroelektrik santralin sayesinde şebekedeki tüketicilerin puant zamanlardaki pik yük talepleri; santralin kapasitesine bağlı olarak kısmen ya da tamamen karşılanabilecektir. Şebeke işletmecisinin finansal kazancı yönünden bakıldığında ise şebekede entegre halde bulunacak olan ve ikili anlaşmalar sayesinde puant saatlerde enerji satın alınacak olan pompaj depolamalı hidroelektrik santralin varlığından dolayı bu saatlerde harici şebekeden en pahalı fiyatlardan elektrik satın alınmayacağından dolayı ekonomik kazanç da sağlanabilecektir.

3. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada birim taahhüt problemi, PF programında oluşturulmuş gerçek bir elektrik dağıtım şebeke modeli üzerinde incelenmiştir. Modellemede, elektrik dağıtım şebekesinde mevcut halde var olan envanterler ile şebekeye entegre halde bulunan üretim santralleri olduğu gibi kabul edilmiştir. Modellemeye ilaveten bir pompaj depolamalı hidroelektrik santral ve birim taahhüt etkisini daha net görebilmek için bir rüzgar enerjine dayalı üretim santrali dahil edilerek birim taahhüt problemini çözecek optimizasyon, PF yardımıyla çalıştırılmıştır.

Modelleme ile analiz sonuçları değerlendirildiğinde; birim taahhüt probleminin başarılı bir şekilde çözüldüğü görülmüştür. Burada değerlendirilen senaryolar kapsamında sonuçlar ele alınacak olursa;

- Birinci senaryoda, dağıtım şebekesinde herhangi bir üretim kaynağı bulunmadığından birim taahhütün çözülmesine yönelik optimizasyon çalıştırıldığında herhangi bir değişim görülmemiştir. Nitekim bu senaryo, mevcut durumu temsil etmektedir.
- İkinci senaryoda, optimizasyon öncesi ve sonrası şebeke güç dağılımının standart sapması sırasıyla 27.00 ve 12.76 olarak hesaplanmıştır. Birim taahhüt probleminin çözülmesine yönelik optimizasyon çalıştırıldığında şebekedeki güç dağılımına yönelik standart sapmada optimizasyon önceki duruma kıyasla %52,74 oranında iyileşme görülmüştür.
- Üçüncü senaryoda, optimizasyon öncesi ve sonrası şebeke güç dağılımının standart sapması sırasıyla 20.81 ve 6.48 olarak hesaplanmıştır. Birim taahhüt probleminin çözülmesine yönelik optimizasyon çalıştırıldığında, şebekedeki güç dağılımına yönelik standart sapmada optimizasyon önceki duruma kıyasla %68,86 oranında iyileşme görülmüştür.

Buradan da anlaşılacağı üzere, gerçekleştirilen çalışma ile elektrik dağıtım şebekesinde entegre halde bulunan üretim santralleri ve modellemeye dahil edilen pompaj depolamalı hidroelektrik santral optimum şekilde kullanılmış ve üretim planlaması doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Daha sonraki araştırmalar Türkiye ölçeğinde ve güncel optimizasyon (GA, PSO, ABC, vb.) metotları kullanılarak yapılabilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışmada veri paylaşımı konusunda yardımcı olan AKEDAŞ Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] I. de la Parra, J. Marcos, M. García, and L. Marroyo, "Control strategies to use the minimum energy storage requirement for PV power ramp-rate control," *Sol. Energy*, vol. 111, pp. 332–343, 2015. doi:10.1016/j.solener.2014.10.038
- [2] W. S. W. Abdullah, M. Osman, M. Z. A. A. Kadir, and R. Verayiah, "Battery energy storage system (BESS) design for peak demand reduction, energy arbitrage and grid ancillary services," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 398–408, 2020. doi:10.11591/ijpeds.v11i1.pp398-408
- [3] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. November 2016, pp. 1205–1230, 2018. doi:10.1016/j.rser.2018.03.068
- [4] E. A. Bakirtzis, C. K. Simoglou, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, "Storage management by rolling stochastic unit commitment for high renewable energy penetration," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 158, pp. 240–249, 2018. doi:10.1016/j.eprsr.2017.12.025
- [5] H. Merdanoglu, E. Yakici, O. T. Dogan, S. Duran, and M. Karatas, "Finding optimal schedules in a home energy management system," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 182, no. January 2019, p. 106229, 2020. doi:10.1016/j.eprsr.2020.106229
- [6] H. Y. Yamin, "Review on methods of generation scheduling in electric power systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 69, no. 2–3, pp. 227–248, 2004. doi:10.1016/j.eprsr.2003.10.002
- [7] A. Bhardwaj, V. K. Kamboj, V. K. Shukla, B. Singh, and P. Khurana, "Unit commitment in electrical power system - A literature review," *2012 IEEE Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2012 - Conf. Proc.*, no. June, pp. 275–280, 2012. doi:10.1109/PEOCO.2012.6230874
- [8] M. S. S. Pinto, V. Miranda, and O. R. Saavedra, "Risk and unit commitment decisions in scenarios of wind power uncertainty," *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 550–558, 2016. doi:10.1016/j.renene.2016.05.037
- [9] S. Y. Abujarad, M. W. Mustafa, and J. J. Jamian, "Recent approaches of unit commitment in the presence of intermittent renewable energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70. Elsevier Ltd, pp. 215–223, Apr. 01, 2017. doi:10.1016/j.rser.2016.11.246
- [10] C. A. Li, R. B. Johnson, and A. J. Svoboda, "A new unit commitment method," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 17, no. 2, p. 50, 1997.
- [11] H. Dai, N. Zhang, and W. Su, "A Literature Review of Stochastic Programming and Unit Commitment," *J. Power Energy Eng.*, vol. 03, no. 04, pp. 206–214, 2015. doi:10.4236/jpee.2015.34029
- [12] I. Abdou and M. Tkiouat, "Unit commitment problem in electrical power system: A literature review," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 1357–1372, Jun. 2018. doi:10.11591/ijece.v8i3.pp1357-1372
- [13] G. Morales-España, J. M. Latorre, and A. Ramos, "Tight and compact MILP formulation for the thermal unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4897–4908, 2013. doi:10.1109/TPWRS.2013.2251373
- [14] H. Pandzic, Y. Dvorkin, T. Qiu, Y. Wang, and D. S. Kirschen, "Toward Cost-Efficient and Reliable Unit Commitment under Uncertainty," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 970–982, 2016. doi:10.1109/TPWRS.2015.2434848
- [15] T. Schulze and K. McKinnon, "The value of stochastic programming in day-ahead and intra-day generation unit commitment," *Energy*, vol. 101, pp. 592–605, 2016. doi: 10.1016/j.energy.2016.01.090
- [16] L. Yang, C. Zhang, J. Jian, K. Meng, Y. Xu, and Z. Dong, "A novel projected two-binary-variable formulation for unit commitment in power systems," *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 732–745, 2017. doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.096
- [17] W. Hickman, A. Muzhikyan, and A. M. Farid, "The synergistic role of renewable energy integration into the unit commitment of the energy water nexus," *Renew. Energy*, vol. 108, pp. 220–229, 2017. doi:10.1016/j.renene.2017.02.063
- [18] I. N. Sam'on, Z. M. Yasin, and Z. Zakaria, "Ant Lion Optimizer for solving unit commitment problem in smart grid system," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 129–136, 2017. doi:10.11591/ijeecs.v8.i1.pp129-136
- [19] S. Siva Sakthi, R. K. Santhi, N. Murali Krishnan, S. Ganesan, and S. Subramanian, "Wind Integrated Thermal Unit Commitment Solution using Grey Wolf Optimizer," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 7, no. 5, pp. 2309–2320, 2017. doi:10.11591/ijece.v7i5.pp2309-2320
- [20] F. M. Gonzalez-Longatt and J. L. Rueda, Eds., *PowerFactory applications for power system analysis*. Berlin: Springer, 2014. (Editor)
- [21] M. F. Anjos and A. J. Conejo, "Unit Commitment in Electric Energy Systems," *Found. Trends® Electr. Energy Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 220–310, 2017. doi:10.1561/3100000014
- [22] A. Viana and J. P. Pedroso, "A new MILP-based approach for unit commitment in power production planning," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 997–1005, 2013. doi:10.1016/j.ijepes.2012.08.046
- [23] L. L. Garver, "Power Generation Scheduling by Integer Programming-Development of Theory," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*

Part III Power Appar. Syst., vol. 81, no. 3, pp. 730–734, 1962. doi:10.1109/AIEEPAS.1962.4501405

[24] G. Morales-Espana, A. Ramos, and J. Garcia-Gonzalez, “An MIP formulation for joint market-clearing of energy and reserves based on ramp scheduling,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 476–488, 2014. doi:10.1109/TPWRS.2013.2259601

[25] M. Saygılı and S. S. Tezcan, “Enerji İletim Hattı Koruma Modellemesi ve Analizi ile Ankara Bölge Uygulaması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 2, pp. 303–316, 2019. doi:10.29109/gujsc.498867

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Fabrication and Characterization of the ZnO Nanoparticles by Controlled Decomposition

Osman Arslan^{*a}

Submitted: 16.12.2021 Revised: 23.02.2022 Accepted: 29.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.11

ABSTRACT

Keywords: Nanoparticle, nanostructures, thermal degradation, ZnO.

ZnO nanoparticles having different size and morphology were obtained by thermal decomposition method with long chain amine ligand and their physical and chemical characterization were comprehensively investigated. Zinc complexes were synthesized by two phase method and this precursor was used for the synthesis of ZnO nanoparticles in high temperature environment. Decomposition behaviour of the mixture with long chain amine precursor was monitored by Fourier Transformed Infrared Technique together with X-Ray Diffraction patterns to analyze the crystal features of the obtained nanocrystals. Transmission Electron Microscopy unveiled the morphological behaviour and crystalline properties of the nanoparticles which show a great homogeneity and monodispersity from the geometrical perspective. Long chain amine precursor concentration was great actor on the formation and growth behaviour of the ZnO nanoparticle as results indicated.

^a Istanbul Sabahattin Zaim University,
Faculty of Engineering and Natural
Sciences, Dept. of Food Engineering
34303 – İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3011-1663

*Corresponding author:
o.arslan@izu.edu.tr

Kontrollü Bozundurma Tekniği İle ZnO Nanopartikül Üretimi ve Karakterizasyonu

ÖZ

Farklı boyut ve morfolojiye sahip ZnO nanopartikülleri uzun zincirli amin ligandı kullanılarak termal bozundurma yöntemi ile elde edilmiş ve fiziksel ve kimyasal karakterizasyonları kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çinko kompleksleri iki fazlı yöntemle sentezlendikten sonra bu öncü reaktif yüksek sıcaklık kullanılarak ZnO nanoparçacık üretimi için vektörleştirildi. Uzun zincirli amin kimyasalını da içeren karışımın bozunma davranışları ve aynı zamanda elde edilen nanokristal özelliklerinin tayini için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Tekniği ile X-Işını Kırınım metotları kullanıldı. Transmisyon Elektron Mikroskobu, geometrik açıdan homojenlik ve monodispersite gösteren nanoparçacıkların morfolojik davranışlarını ve kristal özelliklerini ortaya koymuştur. Sonuçların gösterdiği gibi, uzun zincirli amin kimyasalının konsantrasyonu, ZnO nanoparçacığının oluşumu ve büyüme davranışı üzerinde büyük bir aktördür.

Anahtar Kelimeler:
Nanopartikül, nanoyapılar,
termal bozundurma, ZnO.

1. Introduction

Among the nanostructure synthesis methods, thermal techniques were successfully progressed in the production of nano based structures lately. This is largely motivated due to the distinctive features of these nanoparticles depending on their bulk counterparts. Especially hot injection method, hydrothermal-solvothermal method, microwave technique and thermal decomposition gained large interest driven by aim to modulate and investigate nanoparticle by different methods to detect physical and chemical properties as a vector of nanoparticle size and geometry [1-6]. Therefore monodispersed and homogeneous nanoparticles of inorganic and organic structures (e.g., metal, metal oxide, semiconductors, organic nanostructures) can be obtained with exquisite control over nanoparticle size and geometrical shape [7-8].

Production techniques involving the increased temperature of complex or organometallic structures in high boiling organic solvents with or without surface modifying groups in an oxygenless atmosphere provided by Ar, N₂, He is a versatile platform for the fabrication of nanosized structures. Since huge control over the nanoparticle modulation, polydispersity index, surface features and morphology can be achieved through thermal decomposition methods. We also aimed to synthesize ZnO nanoparticles by controlling the aforementioned properties. After the production of the Zn-carboxylate precursor, long alkyl chain amine was utilized to conduct the high temperature decomposition by amide formation to synthesize the ZnO nanoparticles [9-11].

We therefore report a reproducible synthesis of ZnO nanoparticles with controlled morphology, crystal property and chemical properties through controlled proportion of reactants and incorporation of long alkyl chain for well characterized nanoparticles. The most salient feature of this article is the production of anisotropic ZnO nanoparticles which was obtained by controlled thermal decomposition and the effect of the long chain amine compound which attaches to the nonpolar growing facets of the ZnO nuclei and provide elongated nanostructures. Since amine and long chain acid together form an equilibrium that dominates the selective facet growing, it is possible to modulate the morphologies of the ZnO nanostructures. Results basically reveal that nanoparticles consist of high crystalline structures with varying shapes providing a deep insight on the ZnO nanoparticle formation by thermal decomposition method.

2. Material and Method

2.1. Materials and Precursor Synthesis

Production of ZnO nanoparticles were conducted through zinc-oleate complex 1:2 equivalent amounts of zinc chloride (ZnCl₂, Acros, 98%) and sodium oleate (Sigma Aldrich, 99%) were reacted. In a specific method it follows the addition of 5.0 g of zinc chloride into 24.35 g of sodium oleate (80 mmol, Sigma Aldrich, 99%) which were mixed and vigorously stirred.

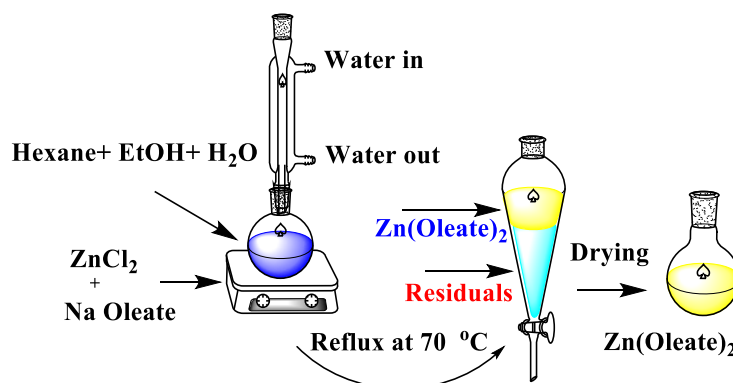


Figure 1. Two phase method for the Zn(Oleate)₂ precursor synthesis

A solvent mixture composed of 80/60/140 EtOH/H₂O/Hexane was utilized. This two phase solution was brought to 70 °C and reflux was conducted at the same temperature for 4-5 h [12]. When the reaction is ended, the zinc-oleate complex at upper organic layer concentrated by rotavapor (Figure 1) and purified by distilled water and dried. Precursor reaction was investigated by FT-IR analysis.

Reaction was clearly shown in Figure 2.

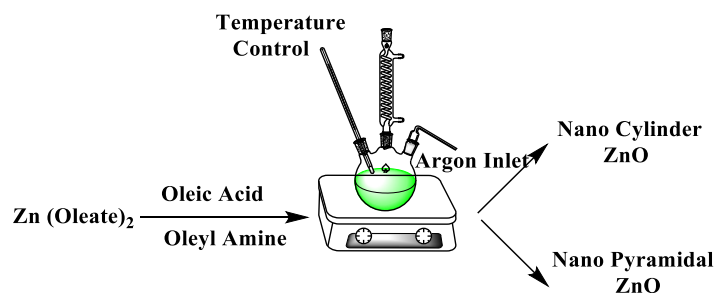


Figure 2. Thermal decomposition technique for the synthesis of ZnO nanoparticles

2.2. Material Analysis

For the detection of morphology and sizes, Transmission electron microscopy (TEM) was performed by Tecnai G2 20 (FEI) on copper grids. Specimens for TEM was prepared by dropping a colloid solution on a 400 mesh copper grid coated by an carbon structure. XRD patterns were measured by STOE-STADI MP vertical system using Cu K α ($\alpha=0.15406$ nm) radiation. For the analysis by FT-IR, Perkin Elmer 400, 4000-400 cm^{-1} range were used and simply platform on ATR Universal Sampling Accesory, Statistical analysis were performed by Image J on the TEM images by counting 50-100 particles. Thermal analysis of the prepared structures was investigated in between 30 to 500°C with a heating rate of 10°C/min by applying nitrogen atmosphere (flow rate; 25 ml/min) in Mettler Toledo TGA/DSC 1 Stare systems.

2.3. Synthesis of the ZnO Nanoparticles

Fabrication process for the ZnO nanocrystals were conducted by heating the (290-300 °C) reaction mixture of Zn(Oleate)_2 /Oleylamine (% 80-90 Riedel Haen)/Oleic acid (Riedel Haen) in a flask (Figure 2). By changing the concentrations and ligand combinations, it was possible to obtain nanocylinder and pyramid like ZnO nanostructures which were analyzed thoroughly. In a typical fabrication procedure, the required amounts of zinc-oleate complex with oleylamine and oleic acid were placed in a flask and this mixture was heated with 5 °C/min heating range under the argon protection untill the desired set-temperature (290-300 °C). According to the reactions equivalence amounts were 1:2:10 and 1:2:6 for the order of Zn(Oleate)_2 :Oleic acid:Oleylamine. Increased oleylamine amounts varied the morphology of the obtained ZnO nanostructures. After reaching to desired temperature, medium was kept at this temperature for 1 h and milky, white-yellow solution of suspensions were clearly observed. After the cooling procedure till room temperature, EtOH was added for precipitation aim and nanostructures were separated by centrifuge at 11 000 rpm. Additionally washing procedure was applied 4-5 times by EtOH and nanostructures were dried under vacuo.

3. Results and Discussion

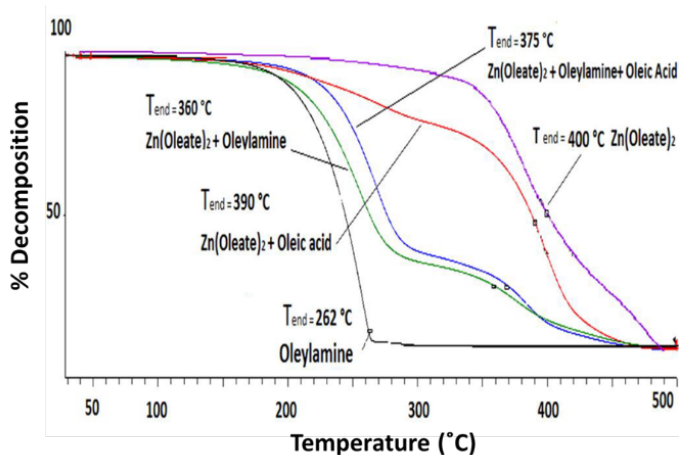


Figure 3. Thermal decomposition profiles of the reaction mixture components

Thermal analysis results in Figure 3 showed that, it is clear that Oleylamine (black) shows a thermal loss by 60 °C which continues till 260 °C. After this point, slight prominent peak which can be labelled as exothermic is detected and attributed to the residual organic structures of the composunds. $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleylamine}$ (green) and $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleylamine} + \text{Oleic Acid}$ (blue) thermogravimetric behaviours are analog but a slight change in decomposition shape is seen. This basically shows that reaction highly dependent on the amine attack onto the $\text{Zn}(\text{Oleate})_2$. Oleic acid can be introduced but amine attack is still crucial for the formation of ZnO nanoparticles by amide formation. Interestingly, $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleic Acid}$ (red) mixture shows another loss of weight which almost ends at 390 °C. This aspect is due to the new formed compound and its relative stability against to thermal decomposition. Actually addition of oleylamine ligant, triggers the decomposition of the $\text{Zn}(\text{Oleate})_2$ complex in the reaction environment around 210 °C which is confirmed by molecular observation (Figure 4) of the precursor mixtures. It is detected that if oleylamine ligand is available in the reaction mixture, it causes a quick start for decomposition due to the thermal effect of amine functional group and its attack onto the Zn-ester group leading to the amide formation.

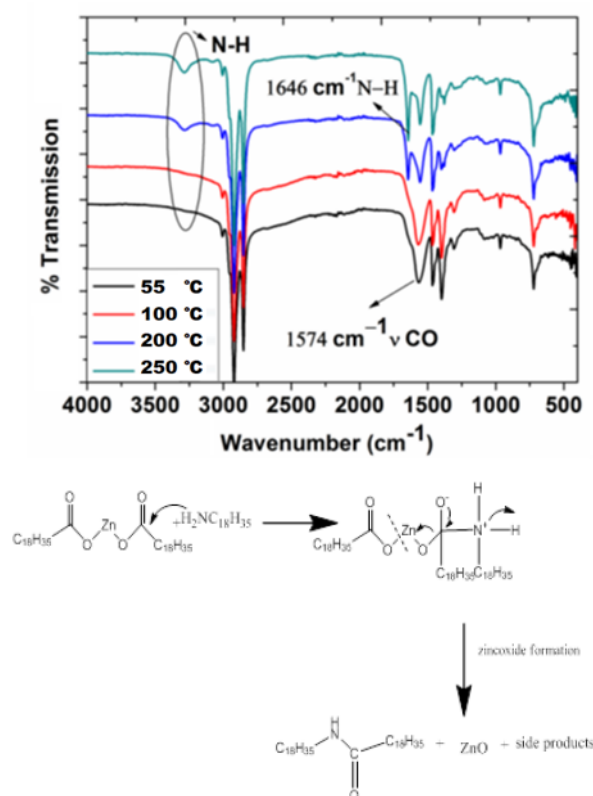


Figure 4. Amide formation during the ZnO nanoparticle production and reaction mechanism

Other decomposition curves reveal that if oleylamine precursor is absent, reaction composition becomes highly resistant to the thermal change which requires high nucleation and growth temperature in the environment. Consequently, a thermal decomposition which is focused at 290-300 °C would provide ZnO uniform nanostructures as the analysis indicated. For a proper control of the decomposition, it is important to detect which point provides more suitable decomposition conditions for the precursor mixture. Therefore thermal analysis was conducted for the reaction mixture and single precursors. Therefore, oleylamine and $\text{Zn}(\text{Oleate})_2$ were analyzed as single components and additionally other mixture examples such as $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleylamine}$, $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleic acid}$ $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleic acid} + \text{Oleylamine}$ were analyzed accordingly. It is seen that $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleic acid} + \text{Oleylamine}$ mixture starts decompose at 290- 300 C where can be accepted as the nanoparticle formation point. Other mixtures such as $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleic acid}$ and $\text{Zn}(\text{Oleate})_2 + \text{Oleylamine}$ also supports this specific temperature detection.

As analysis revealed, mechanism of the ZnO nanoparticle formation is a non-hydrolytic decomposition route and it can be monitored by FT-IR spectroscopy. Nanoparticle formation was detected by the amide bond by the amine attack on the Zn-oleate complex. Since amine attack is leading the formation

of oleyl substituted amide structure, peaks which arises at around 3280 cm^{-1} after 200°C is the primary reaction result for the observable nanoparticle formation. This peak shows a clear N-H formation while it was not observable before lower temperatures. Also carbonyl peak at 1574 cm^{-1} disappears with the reaction.

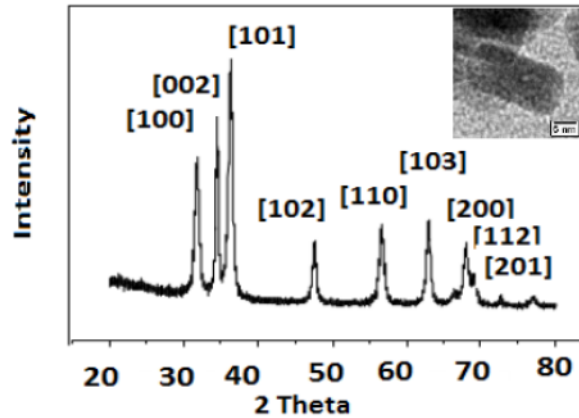


Figure 5. XRD patterns of the cylindrical ZnO nanoparticles

Nonhydrolytic thermal production of nanoparticles slightly varies from hot injection synthesis since temperature control and way of using temperature is different. [13-14]. Thermal heating procedure generally starts at room temperature with all components and heating rate may change the geometrical and surface characteristics of obtained structures.

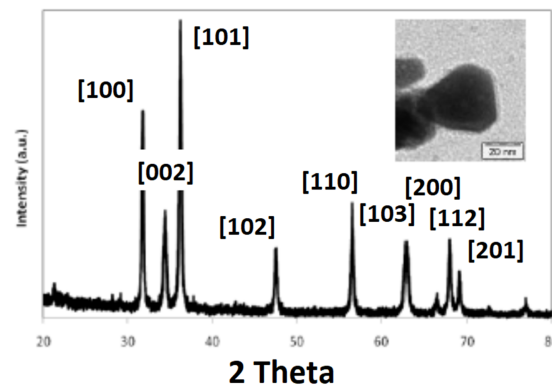


Figure 6. XRD patterns of the triangle shaped ZnO nanoparticles

Suitable temperature starts the crystallization, and when completed other reaction components are removed for obtaining the final nanostructures. Nonhydrolytic decomposition has technical advantages over hot injection method and necessary compositions must be prepared carefully for the desired nanostructure formation. Especially hot injection method needs the separation of formed nucleus in critical diameter from their growth procedure. Still thermal heating procedure enables the upscaling of nanostructures and size uniformity can also be realized with high standards and uniformity.

Table 1. 2Theta positions of the cylindrical and pyramidal ZnO compared with standart ZnO

Miller Indices	JCPDS (36-1451) 2Theta	Cylinder ZnO 2Theta	Pyramid ZnO 2Theta
[100]	31.770	31.75	31.76
[002]	34.422	34.42	34.41
[101]	34.553	34.56	34.55
[102]	47.539	47.54	47.54
[110]	56.635	56.60	56.61
[103]	62.864	62.87	62.86
[200]	66.378	66.38	66.37
[112]	67.961	67.95	67.96
[201]	69.100	69.11	69.10

It is widely known that amine ligands can attach to the nonpolar facets of the ZnO nuclei in the early stages of the nanoparticle formation. This will provide a selective growth and anisotropic nanostructures are obtained. Diffraction patterns of produced cylindrical ZnO nanoparticles are illustrated in Figure 5 and peak positions were compared with standard ZnO as shown in Table 1. According to analysis observed peaks can be indexed to the wurtzite phase of hexagonal ZnO (JCPDS No. 36-1451). After the investigation it is clear that there is no unpredictable peak of different phase of ZnO structure. Also no impurities were observed that confirms the great purity of the produced ZnO nanoparticles. By X-ray line broadening it was able to calculate the average particle size by Scherrer equation and found as 26 nm. Due to the nano size effect, patterns were slightly broadened and it was detected that the diffraction line (002) was narrower than the line (101) indicating an asymmetry in the crystallite shape. Interestingly in Figure 6, if diffraction patterns of the pyramidal ZnO nanoparticles is analyzed, intensity of the (002) peak is lower when compared to (001). Therefore one can easily derived that changing the amine concentration in reaction, it was possible to change the crystalline growth habits of the ZnO nanoparticles. Also there is no unknown or unpredictable peak among the observable peaks which shows the high purity of pyramidal ZnO nanoparticles. X-ray broadening technique (Figure 6) was used for calculating the particle size of the pyramidal ZnO nanostructures and found around 48 nm as also conducted before, using Scherrer equation;

$$D = k\lambda / (\beta \cos\theta)$$

where D is accepted as size in nm, λ is source wavelength (1.54056 Å for CuK α radiation), k is 0.9, β is width at half-maximum intensity and θ can be titled as position for peak.

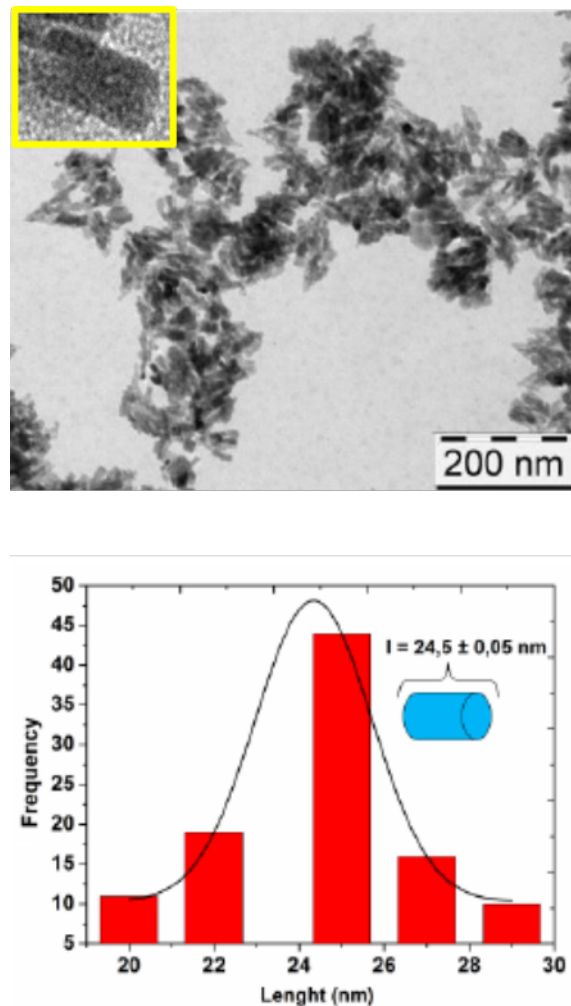


Figure 7. TEM image of cylindrical ZnO nanoparticle and length calculation of the nanostructures

The TEM images of cylindrical and pyramidal ZnO nanoparticles are shown in Figure 7 and Figure 8 with calculated size statistics. The TEM study was conducted to expand the deep characteristics of crystallinity together with morphology and magnitude of the ZnO nanoparticles. Selected TEM pictures of ZnO nanoparticles confirmed that if the reactant proportions are 1:2:10; cylindrical ZnO

nanoparticles with averagely 25 nm in length and 12 nm in diameter were obtained. Cylindrical character is easily seen with enlarged images. Interestingly TEM images also show that cylindrical nanoparticles are attached to each other forming a self assembly when closely analyzed. The average particle size for cylindrical ZnO nanoparticles by histogram was found to be 24.5 nm. As for the pyramidal ZnO nanoparticles, 1:2:6 proportion of reactants seem the main reason of anisotropy which was confirmed by the TEM images. Since Debye-Scherrer positions can be assigned (100), (002), (011), (012), (110), (103) respectively in the XRD patterns, TEM image simply confirmed the calculated primary particle size.

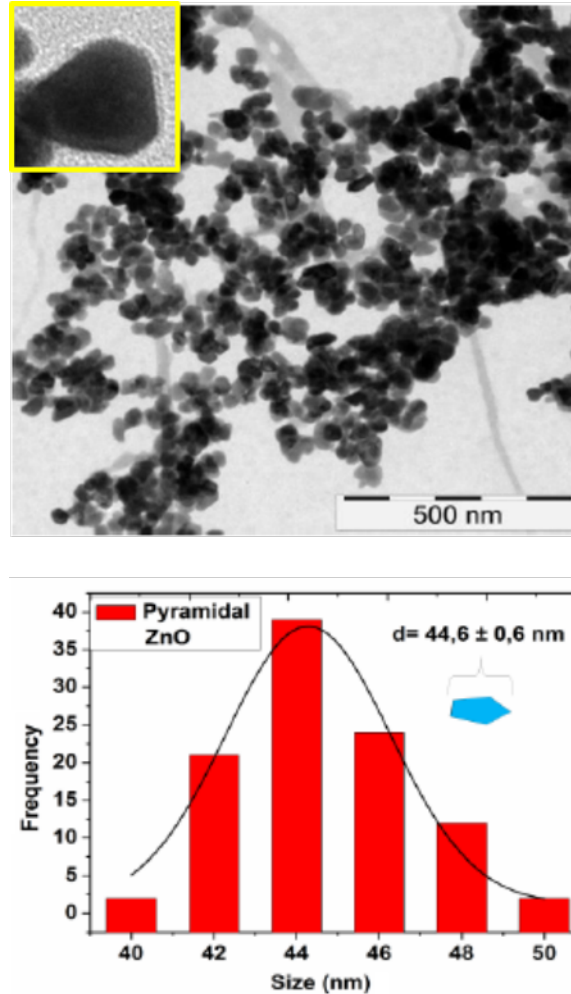


Figure 8. TEM image of pyramidal ZnO nanoparticle and statistical size calculation

The particle size detection by TEM analysis is slightly different to that of the XRD analysis. According to the TEM images diamond like pyramidal structures are clearly seen. It can be easily concluded that in the present work, the effect of the amine proportion on the ZnO nanoparticle morphology and crystallinity were investigated. By using different conditions and reactant proportions it is possible to change the ZnO nanoparticle geometry [15].

ZnO nanoparticles find wide applications in cosmetic industry, creams, antibacterial applications, in pigment industry, photocatalytic industry, solar cell applications, theranostics and polymer industry for its filler and white color properties. It is known that varied shapes of ZnO nanostructures mostly places itself on the relative surface energy of the crystal facets. It is known that ZnO structures generally have three planes: a top and also quite polar zinc (0001) region, also six symmetric and also nonpolar {1010} regions where parallel to the [0001], and lastly a basal and also quite polar oxygen (0001) region. Polarities of these facets vary different mixtures of solvents together with surface modifying ligands, temperature and pH with synthesis techniques produce various size and shape of ZnO nanostructures. It is known that if there is any specific ligand or surface modifier having a specific affinity for a selected nanostructure facets, resulting nanostructure might be changed easily. Therefore

experimental results showed that by changing the concentration of amine ligand it is possible to change the growth habits of ZnO nanoparticles resulting with cylindrical or pyramidal geometry.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] D. İlem-Özdemir, E. Gündoğdu, M. Elinci and M. Aşıkoğlu, "Nanoparticles: from diagnosis to therapy," *International Journal of Medical Nano Research*, vol.3, no.1, pp. 1–5, 2016. doi:10.23937/2378-3664/1410015
- [2] C. M. Donegá, P. Liljeroth and D. Vanmaekelbergh, "Physicochemical evaluation of the hot injection method, a synthesis route for monodisperse nanocrystals," *Small*, vol. 1, no.12, pp.1152-62, 2005. doi:10.1002/sml.200500239
- [3] Y. Jun, J. Choi and J. Cheon, "Shape control of semiconductor and metal oxide nanocrystals through nonhydrolytic colloidal routes," *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 45, pp. 3414-39, 2006. doi:10.1002/anie.200503821
- [4] S. G. Kwon and H. Taeghwan, "Formation mechanisms of uniform nanocrystals via hot-injection and heat-up methods," *Small*, vol. 7, no. 19, pp. 2685-702, 2011. doi:10.1002/sml.201002022
- [5] M. Rajamathi and R. Seshadri, "Oxide and chalcogenide nanoparticles from hydrothermal / solvothermal reactions," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 6, no. 4, pp. 337-345, 2002. doi:10.1016/S1359-0286(02)00029-3
- [6] J. A. Gerbec, D. Magana, A. Washington and G. F. Strouse "Microwave-Enhanced Reaction Rates for Nanoparticle Synthesis," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 127, pp. 15791-15800, 2005. doi:10.1021/ja052463g
- [7] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo and P. Yang, "Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers," *Science*, vol. 292, pp. 1897, 2001. doi:10.1126/science.1060367
- [8] Y. E. Panfil, M. Oded and U. Banin, "Colloidal Quantum Nanostructures: Emerging Materials for Display Applications," *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 57, no. 16, pp. 4274-4295, 2018. doi:10.1002/anie.201708510
- [9] G. Sharma and P. Jeevanandam, "Synthesis of self-assembled prismatic iron oxide nanoparticles by a novel thermal decomposition route," *RSC Adv.*, vol.3, pp.189-200, 2013. doi:10.1039/C2RA22004K
- [10] T. Togashi, K. Tsuchida, S. Soma, R. Nozawa, J. Matsui, K. Kanaizuka and M. Kurihara "Size-Tunable Continuous-Seed-Mediated Growth of Silver Nanoparticles in Alkylamine Mixture via the Stepwise Thermal Decomposition of Silver Oxalate," *Chemistry of Materials*, vol.32, no. 21, pp. 9363-9370, 2020. doi: 10.1021/acs.chemmater.0c03303
- [11] S. Chen, Y. Lu, T. Huang, D. Yan and C. Dong, "Oxygen Vacancy Dependent Magnetism of CeO₂ Nanoparticles Prepared by Thermal Decomposition Method," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 46, pp. 19576-19581, 2010. doi:10.1021/jp1045172
- [12] H. Damm, A. Kelchtermans, A. Bertha, F. Van den Broeck, K. Elen, J. C. Martins, R. Carleer, J. D'Haen, C. De Dobbelaere, J. Hadermann, A. Hardy and M. K. Van Bael, "Thermal decomposition synthesis of Al-doped ZnO nanoparticles: an in-depth study," *RSC Adv.*, vol. 3, pp. 23745-54, 2013. doi:10.1039/C3RA43328E
- [13] D. Wang, M. Xing, Y. Wei, L. Wang, R. Wang, and Q. Shen, "Modeling of Nucleation and Growth in the Synthesis of PbS Colloidal Quantum Dots Under Variable Temperatures," *ACS Omega*, vol. 6, no. 5, pp. 3701-3710, 2021. doi:10.1021/acsomega.0c05223
- [14] S. A. McCarthy, R. Ratkic, F. Purcell-Milton, T. S. Perova, Y. K. Gunko, "Adaptable surfactant-mediated method for the preparation of anisotropic metal chalcogenide nanomaterials," *Sci. Rep.*, vol. 8, pp. 2860, 2018. doi:10.1038/s41598-018-21328-7
- [15] H. C. Morkoç and Ü. Özgür, *Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Designing a System that Records the Sleeping Position Data of Sleep Apnea Patients

Adem Golcuk^a, Mehmet Balci^b, Sakir Tasdemir^c, Serkan Kuccukturk^d
Husamettin Vatansev^e, Hulya Vatansev^f

Submitted: 23.12.2021 Revised: 07.04.2022 Accepted: 07.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.12

ABSTRACT

Keywords: Sleep apnea, Body position sensor, STM microcontroller, ADC, USB

^a Selçuk University, Biomedical Eng. Department, Konya, Turkey
ORCID: 0000-0002-6734-5906

^b Konya Teknik University, Computer Technologies Department, Konya, Turkey
ORCID: 0000-0002-9552-5883

^c Selçuk University, Computer Engineering Department, Konya, Turkey
ORCID: 0000-0002-2433-246X

^d Karamanoğlu Mehmetbey University, Medical Bio. Dept., Karaman, Turkey ORCID: 000-0001-8445-666X

^e Selçuk University, Medical Biochemistry Department, Konya, Turkey
ORCID: 0000-0002-0230-3414

^f Necmettin Erbakan University, Chest Diseases Dept., Konya, Turkey
ORCID: 0000-0002-8382-3904

*Corresponding author:
adem.golcuk@selcuk.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Uyku apnesi, Vücut pozisyon sensörü, STM mikrodnetleyici, ADC, USB

Sleeping positions have a significant impact on exposure of apnea patients to sleep apnea. In this study, the sleeping position of the patient was read with the STM microcontroller by using the body position sensor (SleepSense 1/8" Plug DC Body Position Sensor Kit) produced by the sleep sense company. This sensor produces results with analog signals between 0-2V. This analog signal was read using the ADC (Analog Digital Converter) feature of the microcontroller. This signal read by the microcontroller was sent to the computer via the USB port. The C# software prepared on the computer reads the data from the microcontroller and saves this data and the arrival time of the data to the bit TXT file. The data in this TXT file is ready to be evaluated by signal processing methods. These data, together with other data obtained from the polysomnography device, can be used to learn the body position of the patient at the time of apnea.

Uyku Apnesi Hastalarının Uyku Pozisyonu Verilerini Kaydeden Bir Sistem Tasarımı

ÖZ

Uyku apnesi hastalarının apneye girmelerinde yatış pozisyonlarının önemli bir etkisi vardır. Bu çalışmada sleep sense firmasının üretmiş olduğu vücut pozisyon sensörü (SleepSense 1/8" Plug DC Body Position Sensor Kit) kullanılarak hastanın yatış pozisyonu STM mikrodnetleyicisi ile okunmuştur. Bu sensör 0-2V arasında ürettiği analog sinyallerle sonuç üretmektedir. Bu analog sinyal mikrodnetleyicinin ADC özelliği kullanılarak okunmuştur. Mikrodnetleyici tarafından okunan bu sinyal USB port üzerinden bilgisayara gönderilmiştir. Bilgisayarda hazırlanan C# yazılımı mikrodnetleyiciden gelen verileri okumakta ve bit TXT uzantılı dosyaya bu verileri ve verinin geliş saati ile birlikte kaydetmektedir. Bu TXT uzantılı dosya içerisindeki veriler sinyal işleme yöntemleri ile değerlendirilebilmek için hazır hale gelmiştir. Bu veriler, polisomnografi cihazından elde edilen diğer veriler ile birlikte hastanın apneye girdiği anlardaki vücut pozisyonu öğrenmek için kullanılabilecektir.

1. Introduction

Many patients with obstructive sleep apnea (OSA) exhibit worsening event indexes when lying on their back [1, 2]. If indices become normal during non-supine sleep, positional therapy is an option. Although a variety of methods are available for patients choosing positional therapy, monitoring of compliance remains somewhat difficult, as the reliability of self-reported sleeping position is uncertain [1]. The data produced by PAP (Positive Airway Pressure) devices used by millions of patients around the world can be considered as Big Data. This large data can be used to diagnose undiagnosed sleep apnea and will also be useful in studies of personalization of treatment [3]. As an alternative to the polysomnography method used in the diagnosis of obstructive sleep apnea, home examination and analysis can be performed [4]. APAP (Automatic Positive Airway Pressure) devices need to predict obstructive sleep apnea and analyze the pattern of respiratory flow to adjust pressure parameters [5]. In the master's thesis prepared by Çakmak (2018), a mobile device was developed that can share data during sleep with patients and doctors in the detection of sleep apnea [6]. Agrawal et al. (2017) studied the correlation between the AHI (Apnea Hypopnea Index) values obtained with the PAP device and the AHI values obtained from the PSG (Polysomnography) system in the sleep laboratory [7].

Implanted biomedical devices [8, 9] have the potential to make a revolution in medicine. These devices need the ability to communicate with an external computer system (base station) via a wireless interface. The limited power and computational capabilities of smart sensor-based biological implants present research challenges in various aspects of wireless networking due to the need to have a biocompatible, fault-tolerant, energy-efficient and scalable design [10]. Biomedical sensors are vital in modern life. We live in an era of computerization for every aspect of life. As we all know, computers can only process data. Data should be collected, stored if necessary and transferred to a computer. Biomedical sensors are designed to collect data. It may be necessary to collect data for patients staying in a hospital or at home, or for outpatients [11].

In this study, an electronic system was designed to collect data on the body position sensor. STM microcontroller reads the data from the sensor and sends this data to the computer via USB port. The software developed for the computer also saves these incoming data to a txt file for later evaluation.

2. Material and Method

In this study, a device that records the patient's lying position during the night was designed using an embedded computer system with a STM32f407 microcontroller, according to criteria such as affordable price, processor performance, number of ports, communication protocols and widespread document support. This designed device will be used with the polysomnography device that records the patient's apnea data during the night. While the polysomnography device is used to determine the moments when the patient enters apnea during the night, the designed device determines the lying position of the patient at the time of apnea.

2.1. Embedded system used in the study

In this study, an embedded computer system with STM32f407 microcontroller was used to read and evaluate the analog data coming from the body position sensor and send the results to the computer via USB port.

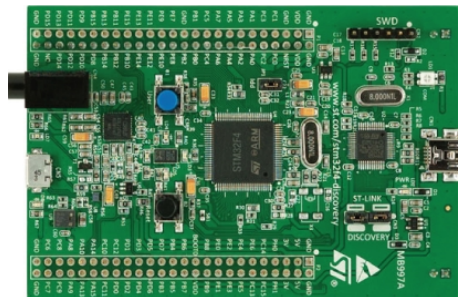


Figure 1. STM32f407 discovery board used in this study

The features of the embedded system used for this device are as follows [12]:

- Microprocessor: 32-bit Arm® Cortex®-M7 L1 cache: 16 Kbytes data and 16 Kbytes command cache, dsp command support, 400 MHz, MPU, 856 DMIPS
- External memory support: SRAM, PSRAM, SDRAM/LPSDR SDRAM, NOR/NAND Flash memory
- Input/Output Ports: At least 168 interrupt ports
- Communication Protocols: 4× I2Cs, 4× USARTs/ 4× UARTs, 6× SPIs, 1× I2S, SWPMI single-wire protocol master I/F, 1× SD/SDIO/MMC, interfaces (up to 125 MHz), 1× USB OTG interfaces
- Timer: 10×16-bit timers, 1× high-resolution timer (2.5ns çözünürlük), 2×32-bit timers, RTC (built-in real time clock)
- Analogue features: 3× ADCs 16-bit 16-bit resolution (Can be reproduced up to 32 channels), 2× 12-bit D/A converters, Dma feature: 1× high-speed, 2× dual-port DMA, Memory requirement: 2 Mbytes of flash drive and 1 Mbyte

2.2. Body position sensor used in the study

Body position sensor, which is also used in polysomnography systems, was used to learn the lying position of the patient during sleep. 1/8" Plug DC Body Position Sensor Kit produced by SleepSense company was used as body position sensor. Figure 2 shows an image of this sensor. The body position sensor gives the patient's lying position (supine, prone, left, right or sitting) as a dc voltage level. This information is read using the ADC feature of the STM microcontroller. The analog data produced by the Body Position sensor was converted into 12-bit digital data with the ADC feature of the microcontroller and read. This 12-bit digital data has been converted into the patient's lying position data in accordance with the information given in the sensor data sheet. An example of this data is given in Figure 5.



Figure 2. The body position sensor used in this study [13]

The computer software prepared with C# to read the data coming from the embedded system via the USB port and save these data with the arrival time is given in Figure 3.

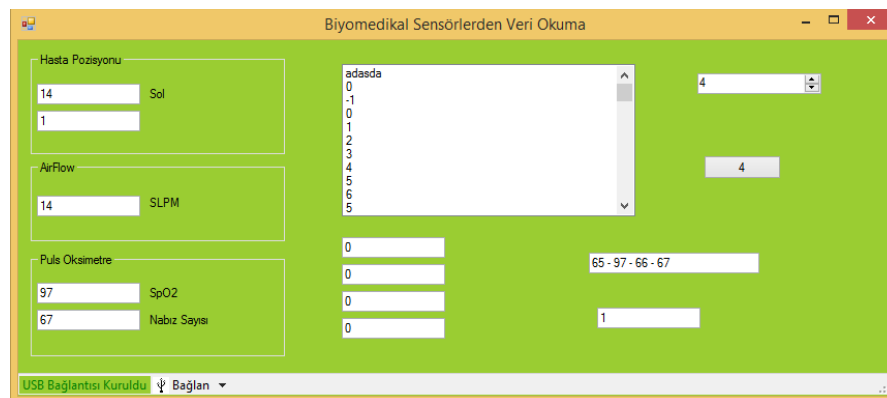


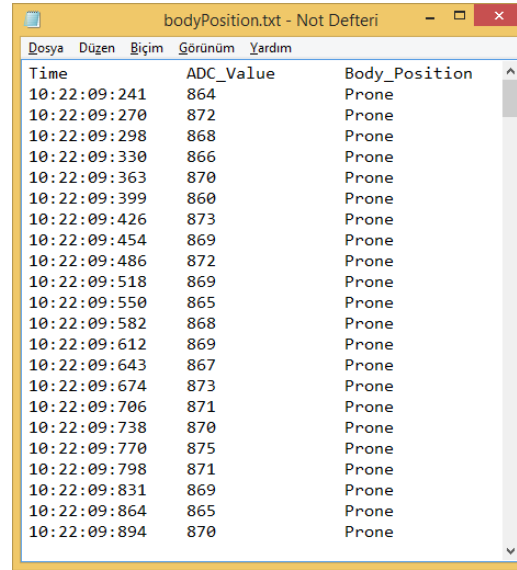
Figure 3. Computer software

While using the embedded computer system and data reading card, it is aimed to develop a data reading system similar to that used in polysomnography systems in the hospital. This is a necessity in order for the signal processing and artificial intelligence software developed with ready-made patient data obtained from the hospital to work in harmony with the instantaneous data obtained from the patient. In this respect, the sensor data obtained as analog has been transferred to the computer environment as digital data in the same format and frequency as the outputs of the polysomnography

system.

3. Results and Discussion

In polysomnography devices, data is read at 32Hz frequency from the body position sensor. In this study, 32 data is read per second from the body position sensor. For this, the timer interrupt of the microcontroller is used. In Figure-4, an example of a txt file where the data from the body position sensor is recorded is given. As can be understood from this file, the file contains the time the data was recorded, the ADC value produced from the sensor, and the patient's lying position information obtained from this ADC value.



Time	ADC_Value	Body_Position
10:22:09:241	864	Prone
10:22:09:270	872	Prone
10:22:09:298	868	Prone
10:22:09:330	866	Prone
10:22:09:363	870	Prone
10:22:09:399	860	Prone
10:22:09:426	873	Prone
10:22:09:454	869	Prone
10:22:09:486	872	Prone
10:22:09:518	869	Prone
10:22:09:550	865	Prone
10:22:09:582	868	Prone
10:22:09:612	869	Prone
10:22:09:643	867	Prone
10:22:09:674	873	Prone
10:22:09:706	871	Prone
10:22:09:738	870	Prone
10:22:09:770	875	Prone
10:22:09:798	871	Prone
10:22:09:831	869	Prone
10:22:09:864	865	Prone
10:22:09:894	870	Prone

Figure 4. Reading data from body position sensor

Figure 5 shows the data samples read from the body position sensor, which is an analog sensor. As can be seen from this graph, while the patient is lying in the supine position, it produces analog values between 582 and 593 from the ADC, while the patient is lying on their right side, it produces analog values between 1077 and 1102, while lying on the left side, it produces analog values between 267 and 277, and when lying in the prone position it produces analog values between 861 and 881.

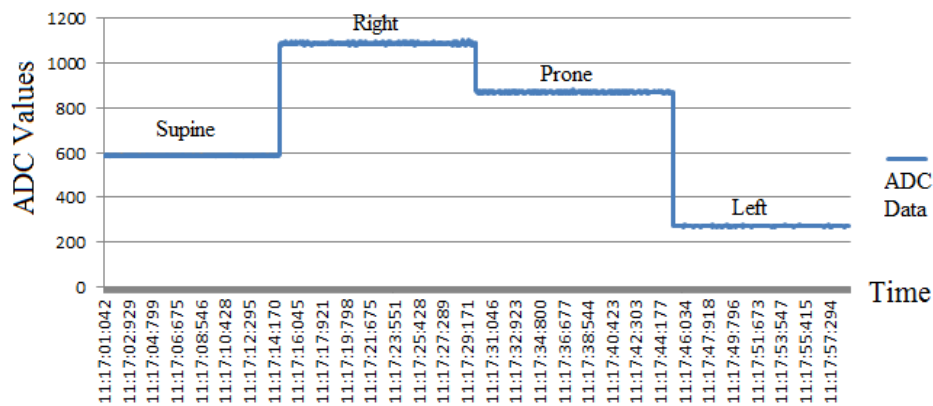


Figure 5. Examples of data read from body position sensor

With polysomnography devices, the patient's EEG, Jaw EMG, EOG (Right and Left eye movements), Snoring sound, ECG (2 channels), Impedance Data, PTT Signal, Pressure Flow (Ora-Nasal airflow pressure), SPO2 (Oxygen saturation), Light sensor, PLM (leg movements), Pressure Snore, Thorax (Abdominal and chest movements) and Heart Rate data are read. With these data, the moments when the patient enters apnea can be detected. With the body position sensor, the lying position of the patient at the time of apnea can be determined.

4. Conclusion

In this study, the use of a body position sensor was proposed to determine the lying position of sleep apnea patients at the time they entered apnea. The body position sensor used in this study produces analog data in mV. These data are increased to Volt level with filter circuits and are free from noisy data. The analog data at the output of the filter circuit were read with the ADC feature of the microcontroller and converted into position information. The data obtained at the end of this study showed that body position sensors are suitable for determining the lying position of the patient during apnea.

Acknowledgment

We would like to thank the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) for supporting this study with the project number 5190006 within the scope of the 1505 University-Industry Cooperation Support Program.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] K. Russo and M. T. Bianchi, "How reliable is self-reported body position during sleep?," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 12, no. 1, pp. 127-128, 2016. doi:10.5664/jcsm.5410
- [2] E. Senthilvel and J. Krishna, "Body position and obstructive sleep apnea in children with Down syndrome," *Journal of clinical sleep medicine*, vol. 7, no. 2, pp. 158-162, 2011. doi:10.5664/jcsm.28103
- [3] J. L. Pépin, S. Bailly, and R. Tamisier, "Big Data in sleep apnoea: Opportunities and challenges," *Respirology*, vol. 25, no. 5, pp. 486-494, 2020. doi:10.1111/resp.13669
- [4] F. Mendonça, S. S. Mostafa, A. G. Ravelo-García, F. Morgado-Dias, and T. Penzel, "Devices for home detection of obstructive sleep apnea: A review," *Sleep medicine reviews*, vol. 41, pp. 149-160, 2018. doi:10.1016/j.smrv.2018.02.004
- [5] R. Jane, "Engineering Sleep Disorders: From classical CPAP devices toward new intelligent adaptive ventilatory therapy," *IEEE pulse*, vol. 5, no. 5, pp. 29-32, 2014. doi:10.1109/MPUL.2014.2339292
- [6] D. Demirkol Çakmak, "Mobile sleep apnea detection and monitoring based on thermocouple and pulse oximeter sensors," Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2018.
- [7] R. Agrawal, J. A. Wang, A. G. Ko, and J. E. Getsy, "A real-world comparison of apnea-hypopnea indices of positive airway pressure device and polysomnography," *Plos one*, vol. 12, no. 4, p. e0174458, 2017. doi:10.1371/journal.pone.0174458
- [8] A. Gölcük and İ. Güler, "The use of stepper motor-controlled proportional valve for fio2 calculation in the ventilator and its control with fuzzy logic," *Journal of medical systems*, vol. 41, no. 1, pp. 1-10, 2017. doi:10.1007/s10916-016-0650-y
- [9] A. Gölcük, H. Işık, and İ. Güler, "Design and construction of a microcontroller-based ventilator synchronized with pulse oximeter," *Journal of Medical Systems*, vol. 40, no. 7, pp. 1-10, 2016. doi:10.1007/s10916-016-0538-x
- [10] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann, "Research challenges in wireless networks of biomedical sensors," in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, Rome, Italy, 2001*. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/381677.381692>. [Accessed 01.10.2021].
- [11] M. Engin, A. Demirel, E. Z. Engin, and M. Fedakar, "Recent developments and trends in biomedical sensors," *Measurement*, vol. 37, no. 2, pp. 173-188, 2005. doi:10.1016/j.measurement.2004.11.002
- [12] STMicroelectronics. "STM32F407/417. Microcontrollers & Microprocessors," Sep. 3, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f405rg.pdf>. [Accessed 03.10.2021].
- [13] SleepSense. "DC Body Position Sensor Kit - 1/8" Female Plug". [Online]. Available: <https://sleepsense.com/shop/sleepsense-body-position-sensors/dc-body-position-sensor-5-dc-levels-safety-din-connectors-2/>. [Accessed 03.03.2022].



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Development of Internet of Things-Based Rumen Health Monitoring Prototype with Fuzzy Logic Controllers for Cattle

Fatih GÜRCAN^a, İ. Alper DOĞRU^b, Murat DÖRTERLER^c, İsmail ATACAK^{*d}

Submitted: 20.01.2022 Revised: 20.02.2022 Accepted: 30.03.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.13

ABSTRACT

Keywords: Internet of things, Wireless networks, Fuzzy logic controller, Rumen health, pH measurement

^a Gazi University,
Graduate School of Natural
and Applied Sciences,
Dept. of Computer Engineering,
06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9515-6782

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-9324-7157

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1127-515X

^d Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6357-0073

*Corresponding author:
iatacak@gazi.edu.tr

In this study, a prototype based on fuzzy logic (FL) controller and internet of things (IoT) was developed to monitor rumen health parameters in cattle. In the system build as a prototype, the monitoring process related to the parameters is followed through three different applications developed on the Android operating system, the Thingspeak service and the WEB environment. The first application, which is an Android-based program, warns the user in case of any abnormality related to the rumen health. The other two applications allow monitoring and analyzing rumen health parameters in real time. The system implements a process that measures at varying time intervals to display the values of rumen health parameters, pH and temperature. The management of this process is carried out by the FL controller depending on the pH and temperature changes. This measurement, which is made at varying time intervals, is the most important feature that distinguishes our study from studies in the literature. Because in the studies reported in the literature, measurements are made at fixed time intervals. The relevant feature brings with it two important contributions for the system we propose. The first is to accelerate the precautions to be taken regarding animal health by enabling the system to measure at more frequent intervals in cases of deterioration in the pH level of rumen. The second is to reduce the energy consumed by the parameter measuring device from the battery by allowing the system to measure at longer intervals when the pH level of rumen is in balance.

Büyükbaş Hayvanlar için Bulanık Mantık Denetleyiciler ile Nesnelerin İnterneti Temelli Bir İşkembe Sağlığı İzleme Prototipinin Geliştirilmesi

ÖZ

Bu çalışmada, büyükbaş hayvanlarda işkembe sağlığı parametrelerini izleme amaçlı bulanık mantık (BM) denetleyici ve nesnelerin internetine (Nİ) dayanan bir prototip geliştirilmiştir. Prototip olarak oluşturulan sistemde parametreler ile ilgili izleme süreci Android işletim sistemi, Thingspeak servisi ve WEB ortamında geliştirilmiş üç farklı uygulama üzerinden takip edilir. Android temelli bir program olan ilk uygulama, işkembe sağlığı ile ilgili herhangi bir anormallik oluşması durumunda kullanıcıyı ikaz eder. Diğer iki uygulama ise işkembe sağlığı parametrelerini gerçek zamanlı olarak izlemeye ve analiz etmeye olanak sağlar. Sistem, işkembe sağlığı parametreleri pH ve sıcaklık değerlerini görüntülemek için değişen zaman aralıkları ile ölçen bir süreci yürürlüğe koyar. Bu sürecin yönetimi, pH ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak BM denetleyici tarafından yapılır. Değişen zaman aralıkları ile yapılan bu ölçüm, bizim çalışmamızı literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli özelliğidir. Çünkü literatürde bildirilen çalışmalarda ölçümler sabit zaman aralıkları ile yapılır. İlgili özellik önerdiğimiz sistem için iki önemli katkıyı beraberinde getirir. İlki, işkembe içerisinde pH seviyesinde bozulma olduğu durumlarda sistemin daha sık aralıklar ile ölçüm almasını sağlayarak hayvan sağlığı ile ilgili alınabilecek önlemleri hızlandırmasıdır. İkincisi, pH seviyesinin dengede olduğu durumlarda sistemin daha uzun aralıklar ile ölçüm almasını sağlayarak parametre ölçerin pilden tüketeceği enerjiyi azaltmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin interneti, Kablosuz ağlar, Bulanık mantık, İşkembe sağlığı, pH ölçümü

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte, fiziksel nesneleri birbirine bağlayan bir iletişim ağı olarak bilinen Nesnelerin İnternetinde de (Nİ) önemli gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler sağladığı katkılar sebebi ile birçok alanda Nİ teknolojisinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Evler, endüstri sektörü, enerji sektörü, eğitim, sağlık, tarım ve hayvancılık, çevrecilik ve şehircilik Nİ teknolojisinin katkı sağladığı önemli kullanım alanları arasında yer alır. İlgili uygulama alanlarında bu teknolojinin kullanımındaki ortak amaç hizmet, kalite, verim ve üretkenliği artırmaktır. Nİ teknolojisi bu amaçları yerine getirmek için ilk olarak uygulama alanındaki verileri toplar. Sonra topladığı verileri büyük veri haline getirerek buluta aktarır. En son olarak ise buluttaki verileri amaçlara uygun bir şekilde işleyerek analiz eder [1-3]. Analiz sürecinde istatistiksel metotlar kullanıldığı kadar, yapay sinir ağı, makine öğrenimi, bulanık mantık (BM) gibi bir çok uygulamada başarılı sonuçlar verdiği bilinen bir takım yapay zeka metotları da kullanılmaktadır.

Günümüzde Nİ' nin hayvancılıktaki kullanımı yaban hayvanlarından deniz hayvanlarına kadar çok geniş bir yelpazeye yayılmış olsa da, yaban hayvanları, kümes hayvancılığı ve büyükbaş hayvancılık bu teknolojinin başarılı ve verimli bir şekilde uygulandığı alanlar olarak karşımıza çıkar. Yaban hayvanları ile ilgili uygulamalar hayvanların konumlarının izlenmesi, doğal yaşam alanlarının gözlenmesi ve davranışlarının tanınarak anlaşılması üzerine odaklanmıştır [4]. Bu çalışmalarda yaban hayatının görüntülenmesini sağlayan birimi algılayıcılar, donanım, yazılım ve iletişim araçları oluşturur. Algılayıcı tipi kullanılan uygulamaya göre değişmektedir. Hayvanların konumlarının izlenmesinde algılayıcı olarak GPS gibi uydu konumlandırma alıcılar kullanılırken, davranış tanıma ve doğal yaşam alanlarının gözlemlenmesinde sıcaklık, nem, hareket ve ivme ölçme algılayıcıları ile görüntüleme algılayıcılarından yararlanılmıştır [5, 6]. Yazılım kısmı ise basit tipteki işletim sistemlerini, sürücülerini veri alış verişinin düzenlenmesindeki yazılımlardan meydana gelir. Bu uygulamalarda kullanılan iletişim araçları hücresel ve kapiler olmak üzere iki tipte karşımıza çıkabilir. Her ikisi de uzak mesafelerde kullanılabilirken, hücresel iletişim araçları ülke çapında iletişim yelpazesini kapsar ve büyük ölçekli baz istasyonları gerektirir [6].

Nİ teknolojisi, tüm dünyada et ve yumurta ürünlerinin yoğun bir şekilde tüketildiği kümes hayvancılığı endüstrisinin dönüşümünde de çok önemli bir role sahiptir [7]. Genel olarak et ve yumurta üretimini artırma amaçlı yapılan bu dönüşümlerde Nİ temelli sistemler ya tavuk çiftliklerinin denetimi ya da kümes hayvanlarının sağlığı üzerine uygulanır. Bu uygulamalarda Nİ temelli sistemler sıcaklık, nem, gaz, ışık, ses ve kamera gibi farklı algılayıcı grupları ile verileri toplayarak video/görüntü işleme, ses işleme yetenekleri ile birlikte sınıflandırma algoritmaları üzerinden analizleri gerçekleştirmiştir [8]. Günümüzde bu cihazlarda kullanılan yazılım, donanım ve iletişim araçlarına ait maliyetin giderek düşmesi, verimliliği artırma adına büyük tavuk ya da kanatlı hayvan çiftliklerinde bu sistemlerin kullanımını bir ihtiyaç haline getirmiştir.

İnsan sağlığı açısından kümes hayvanlarının ürünlerinin tüketimi kadar büyükbaş hayvanlara ait et ve süt ürünlerinin tüketimi de hayati bir önem arz eder. Bu yüzden et ve süt üretimi büyükbaş hayvancılığın temel hedefleri arasında yer alıp, ilgili ürünlerin veriminin artırılması da bu sektörde üretim yapan kişi ve kurumların temel hedefleri arasında yer almıştır [9, 10]. Büyükbaş hayvanlarda et ve süt verimini etkileyen faktörler arasından en önemlileri sağlık ve beslenmedir. Onların sürekli olarak sağlık durumlarının izlenmesi ve buna bağlı olarak beslenmelerinin düzenlenmesi bu sektörün hedefleri doğrultusunda gitmesini sağlayacaktır. Bu anlamda bakıldığında büyükbaş hayvancılık sektöründe Nİ teknolojisinin kullanımının et ve süt üretiminin artırılmasına önemli katkılar sağladığı görülecektir. Uygulamada algılayıcı, donanım, yazılım ve iletişim araçlarından oluşan ve akıllı çiftlikler olarak tanımlanan yapılar özellikle bu amaç için geliştirilmiş sistemleri temsil eder [11]. Bu yapıda büyükbaş hayvanların sağlık durumları ile ilgili bilgilerin toplanması, sağlanması ve yemlenmesi ile ilgili tüm işlemler otomasyon sistemi dâhilinde geliştirilmiş robotlar üzerinden yapılır.

Bu makalede, büyükbaş hayvanlarda işkembe içi pH ve sıcaklık değişimlerini kablosuz bir şekilde BM denetleyicinin belirlediği aralıklar ile kullanıcının izlemesi amaçlı WEB ara yüzü ve ThingSpeak servisine aktaran ya da parametre değerlerindeki değişimler sağlıksız bir duruma işaret ettiğinde Android temelli cihaza uyarı mesajı gönderen Nİ temelli bir işkembe sağlığı izleme prototipi sunulmaktadır. İkinci bölümde Nİ' nin büyükbaş hayvancılıkta uygulamaların gösteren çalışmalar verilir. Üçüncü bölümde Nİ temelli işkembe sağlığı izleme prototipi; algılayıcılar, yazılım, donanım ve iletişim araçlarını içine alan tüm bileşenleri ile detaylı bir şekilde anlatılır. Dördüncü bölümde

geliştirilen prototipin deneysel sonuçları sunulur ve tartışılır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlara göre önerilen sistem değerlendirilir.

2. Büyükbaş Hayvancılıkta Nİ Uygulamaları (IoT Applications in Cattle Farming)

Akıllı hayvancılık olarak da bilinen Nİ temelli izleme sistemleri, hayvancılıkta ses, görüntü, çevre ve işkembe sağlığı verilerini bir takım algılayıcılar üzerinden Nİ teknolojisi ile birlikte buluta aktararak büyük veri halinde toplayan ve onlar üzerinde farklı algoritmaları kullanan yazılımlar üzerinden izleme ve analiz etme kabiliyetine sahip otomasyon esaslı uygulamalardır. Bu uygulamaları işlevsel açıdan değerlendirdiğimizde; hayvan sağlığı izleme sistemleri, hayvan davranışı izleme sistemleri ve akıllı çiftlikler olmak üzere 3 farklı kategoride ele alabiliriz.

Hayvan sağlığı izleme sistemleri, büyükbaş hayvanın vücudu ve çevresi ile ilgili verileri kullanarak hastalığını teşhis eden, kullanıcısına uyarı göndererek erken müdahaleye olanak sağlayan görüntüleme amaçlı farklı izleme ortamlarını kullanan uygulamalardır. Huang ve ark' ları yaptıkları bir çalışmada hayvanlara daha iyi bir sağlık hizmeti ve çevre sağlamanın yanı sıra onların adaptasyonunu da artırmaya yönelik bir izleme sistemi geliştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri sistemde kablosuz sensör ağını oluşturmak için denetleyici olarak bir Arduino kartı, başı boş hayvanları ayırt etmek için bir RFID etiketi ve alıcısı ve internete bağlanmak için Nİ kullanılmıştır [12]. Faruq ve ark' ları süt inekleri için Nİ teknolojisi temelli yapay zekayı kullanan bir sağlık izleme ve hastalık teşhis sistemi önermişlerdir. Sistem üzerinde yaptıkları testler ile önerdikleri sistemin, sıcaklık verilerini 0.6 C°' lik ve kalp atışı verilerini dakikada 3.5 vuruluk bir hata oranıyla görüntüleyebildiğini göstermiştir. Ayrıca hastalık teşhisi üzerine yaptıkları testlerde geliştirdikleri sistemin fiziksel semptomlara göre %90' lık bir doğrulukla hastalığı teşhis edebildiğini ispatlamışlardır [13]. Chaudhry ve ark' ları hayvan sağlığı izleme sistemleri ve onların donanımları üzerine bir araştırma yaparak, Nİ teknolojisini kullanan gerçek zamanlı bir sağlık izleme sistemi önermişlerdir. Önerdikleri sistem, hayvana ait vücut sıcaklığı, kalp atış oranı, geviş getirme durumu, çevresel sıcaklık ve nem ile kamera üzerinden hayvanın davranışsal verilerini izleyen ve bu verilere göre hasta hayvanları makine öğrenmesi temelli algoritmalar üzerinden teşhis edebilme yeteneğine sahip bir uygulamadır [14]. Muthumanickom ve ark' ları Radyo Frekans etiketleme (RFID) teknolojisini kullanarak büyükbaş hayvanlarda sıcaklık değişimlerini otomatik olarak ölçen düşük güç tüketimi ve maliyete sahip bir sağlık izleme sistemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri sistem, RFID teknolojisi üzerinden sıcaklık değişimlerini Thingspeak servisine aktarır ve sıcaklık değişimlerinde bir anormallik olduğunda kullanıcıyı ikaz eder [15].

Hayvan davranışı izleme sistemleri özellikle hayvanların hareketlerine ve seslerine dayalı davranışları ya da çevresel verilerinden yararlanarak onların hastalanıp hastalanmadıklarına, kızgınlık dönemlerinde olup olmadıklarına yada doğumlarının yaklaşıp yaklaşmadığına karar veren, bilgilendiren ve verileri izleme olanağı sağlayan uygulamalardır. Zaitov meralarda otlayan büyükbaş hayvanlarda olabilecek yaralanma ve hastalanmaları erken bir şekilde teşhis edilerek tedbir alınabilmesi için geliştirdiği hayvan izleme sistemine Nİ teknolojisini uygulamıştır. Ticari olarak yürürlüğe konulabilmesi için güç tüketimi ve maliyet açısından düşürülmeye ihtiyaç duyan bu sistem çözümünü hayvanların meradaki konumunu, etkileşim verilerini ve çevresel verileri toplayan bir kablosuz sensör ağı üzerinden üreterek sağlar [16]. Xia ve ark' ları inek kızgınlığı üzerine bir araştırma yaparak kızgınlığı tespit etme amaçlı bir uygulama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri uygulamayı 269 Holstein ineği üzerinden test etmişlerdir. Performans olarak %91.86 bir doğruluk ve 0.848' lik Kappa değeri elde ederek, geliştirdikleri sistemin kullanılabilirliğini ispatlamışlardır [17]. Gurusamy ve ark' ları çalışmalarında bir sürü içerisinde bulunan ineklerin Nİ ve kablosuz sensör ağı yoluyla izlenmesine olanak sağlayan bir sistemi sunmuşlardır. Sistem, ineğin boynuna bantlı ses algılayıcısından gelen verinin durumuna göre onun hastalık olup olmadığına karar veren bir yazılımı da içerisinde barındırır. Şayet hayvan da hastalık durumu oluşmuş ise sahibini bilgilendirme sistemi üzerinden gönderdiği bir mesaj ile ikaz eder. Bu çalışmada yazarlar aynı zamanda Cisco Packet Tracer programını kullanarak sistemin benzetimini yapmışlardır [18]. Park ve ark' ları meralarda otlayan ineklerin hareket ve davranışlarını gözlemlenme amaçlı bulut tabanlı bir izleme sistemi tasarlamış ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Dairesel bir boyunluk halinde tasarladıkları sistemin kablosuz sensör ağları ve Nİ yoluyla hayvan aktivitelerini gerçek zamanlı olarak bulut sistemine aktarabildiğini yaptıkları deneysel çalışmalar ile göstermişlerdir [19].

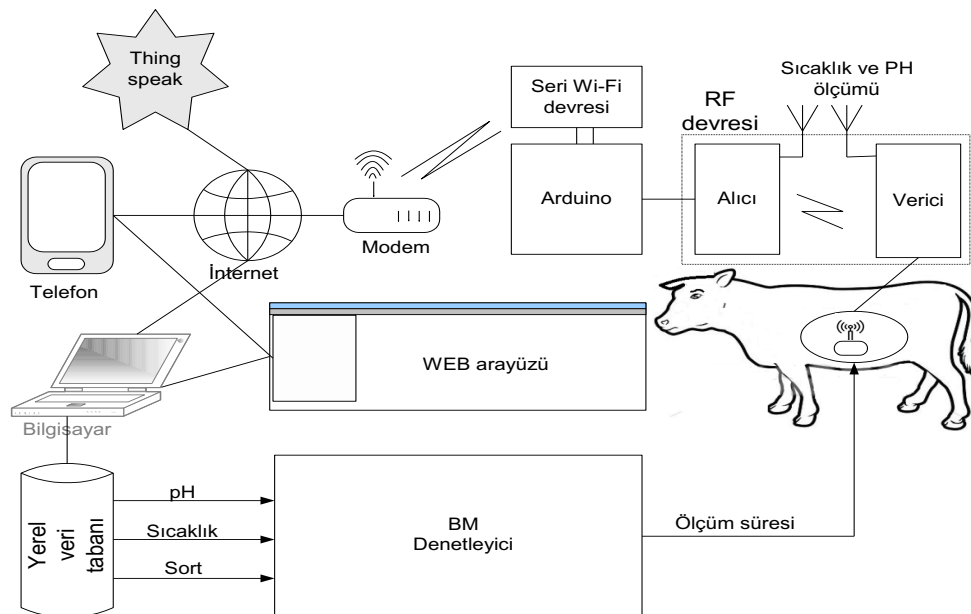
Akıllı hayvan çiftlikleri hayvanlara yem ve su verilmesinin, ortamlarının havalandırmasının, çevrelerinin izlenmesinin, bulundukları ortamın iklimlendirilmesinin ve verilere dayalı üretilen durum

bilgisine bağlı çiftlik sahibinin bilgilendirilmesinin otomatik olarak yapıldığı bilgisayar temelli otomasyon uygulamalarıdır. Menon ve ark' ları Ni' ye dayanan akıllı bir hayvan çiftliği uygulaması geliştirmişlerdir. İhtiyaç duyulduğunda yemleme ve sulama yapma yeteneklerine sahip bu uygulama bio-gaz fazlalığını dışarı artabilen, yangını algılayabilen ve çevreyi kontrol edebilen otomatik bir sistemdir. Uygulamada bu işlevler yerine getirmek için su seviyesi, ultrasonik, gaz, sıcaklık ve nem algılayıcıları ile birlikte bir IP kamera kullanılmıştır [9]. Yoon ve ark' ları düşük güçlü bluetooth, düşük güçlü geniş alan ağı iletişim modüllerini kullanan ve kablolu iletişim ağını içeren bir akıllı çiftlik sistemi oluşturdular. Bu çiftlikte kontrol ve izleme işlemlerini TCP/IP alt yapısını kullanan bir Nİ haberleşme protokolü olan MQTT (Message Quening Telemetry Transport) üzerinden yaptılar [20]. Easwaran ve ark' ları Nİ teknolojisine dayanan bir akıllı hayvan çiftliği prototipi tasarlamışlardır. Yaptıkları çalışmada bir ineğin ayakta durmak, yürümek ve otlamak gibi temel faaliyetlerini derin öğrenme modeli kullanarak sınıflandırdılar. Buna ek olarak egzoz ve inkübatör sistemini kontrol ederek, Nİ üzerinden sonuçları izlenebilmesi için yerel bir WEB uygulamasına aktardılar [21].

Sonuç olarak akıllı hayvancılık kapsamında ele alınan tüm uygulamalar aslında büyükbaş hayvanın sağlık, beslenme ve çevresel şartlarının iyileştirilmesine dayanır. Sağlıklı bir hayvan düzenli bir şekilde beslenirse o hayvanın kilo alması ya da süt verimi de artmış olur. Diğer taraftan hayvanın davranışlarından kızgınlık dönemlerinin net bir şekilde belirlenmesi düzenli bir şekilde üremelerini sağlar.

3. Nİ Temelli İşkembe Sağlığı İzleme Prototipi (IoT-Based Rumen Health Monitoring Prototype)

Nİ temelli işkembe sağlığı izleme prototipi, büyükbaş hayvan yetiştiriciliğinde hem hayvan sağlığını koruma hem de et ve süt verimliliğini artırma amaçlı işkembe içi pH ve sıcaklık değerlerini bir verici ve alıcı modül kullanarak Arduino programlama platformu üzerine takılı seri Wi-Fi modül yoluyla aynı ağı kullanan bilgisayar, cep telefonu ve Thingspeak servisine aktararak hayvanın işkembe sağlığını izleme ve verileri grafiksel olarak görüntüleme imkanı sağlayan bir sistemdir. Uygulamada işkembe sağlığını izleme amaçlı geliştirilmiş benzer sistemler olsa da, bu sistemlerin ölçümlerini sabit zaman aralıkları ile gerçekleştirmelerinden dolayı özellikle işkembe içi asidoz seviyesinin yüksek olduğu dönemlerde acil müdahaleyi gerektirecek pH ve sıcaklık seviye dengesizliklerini yakalamada yetersiz kaldıkları görülmektedir. Hayvan sağlığı için risk oluşturan bu problem, bizim geliştirdiğimiz sistemde ölçümlerin işkembe içi pH ve sıcaklık parametrelerine göre değişen zaman aralıkları ile alınması sonucu çözümlenmiştir. Bu amaçla bir BM denetleyici tasarlanmıştır. Şekil 1' deki blok diyagramdan anlaşılacağı üzere sistem donanım ve yazılım olmak üzere iki ana kısımdan oluşur.



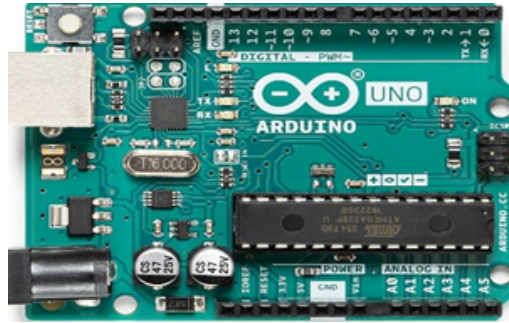
Şekil 1. Nİ temelli işkembe sağlığı izleme prototipinin blok diyagramı
(Block diagram of the IoT-based rumen health monitoring prototype)

Bu yapıda algılayıcılar, verici, alıcı, seri Wi-Fi devresi ve Arduino programlama kartı sistemin donanım

kısmını temsil ederken, WEB arayüzü ve Thingspeak gibi sonuç görüntüleme ortamları, BM denetleyici ve donanımlar üzerinden veri transferi ile veri kaydetmeye olanak sağlayan programlar onun yazılım kısmını oluşturur. Sistemin donanım ve yazılım olarak tüm bileşenleri aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmaktadır.

3.1. Arduino programlama kartı (Arduino programming board)

Arduino programlama kartı sistemde iki aşamalı bir süreci yönetir. İlk işkembe içi parametre ölçerin gönderdiği ölçüm sonuçlarının RF alıcı üzerinden alınıp Wi-Fi devresi üzerinden bilgisayar ve izlenme ortamlarına aktarılmasına kadar geçen sürecin yönetimidir. İkincisi ise BM denetleyicinin ürettiği ölçüm süresi sonucuna göre işkembe içi parametre ölçerin uykuda kalma durumunun yada ölçüm için bekleme süresinin yönetildiği süreçtir. Sistemde her iki yönetim sürecini yerine getirmek için Arduino programlama kartı olarak Şekil 2' de gösterilen Arduino UNO R3 kullanılmıştır.

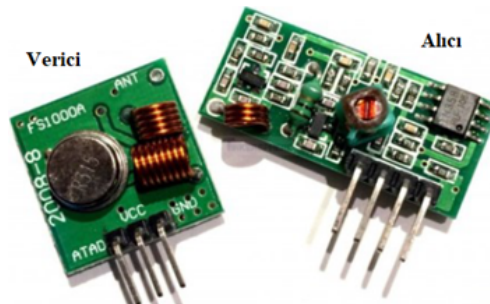


Şekil 2. Arduino UNO R3 (Arduino UNO R3)

Esnek bir yazılım ve donanım mimarisine sahip olan Arduino UNO yaygın kullanılan bir elektronik geliştirme ortamıdır. ATmega328 mikro denetleyicisini içeren bu kart bir mikro denetleyicide olması gereken tüm bileşenleri üzerinde taşır. Arduino UNO, 6' sını darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation-PWM) çıkışı olmak üzere toplam 14 adet dijital giriş çıkışı ve 6 adet analog girişe sahiptir. İstenirse analog girişler referans pin girişi üzerinden sınırlandırılabilirler [22]. Ya bir bilgisayar yada bir adaptör veya pil üzerinden ayrı bir şekilde çalıştırılabilirler.

3.2. Radyo frekans (RF) devresi (Radio frequency circuit)

RF devresi işkembe içi parametre algılayıcı devreler ile Arduino programlama kartı arasında kablosuz bir şekilde Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude Shift Keying-ASK) modülasyon tekniğini kullanarak veri aktaran hazır bir kittedir. Şekil 3' de gösterildiği gibi bu kit, 433 Mhz'lik radyo frekansını üzerinden birbiri ile iletişim kuran alıcı ve verici modüllerden oluşur [23].



Şekil 3. RF verici ve alıcı modülleri (RF transmitter and receiver modules)

Verici modül, pH ve sıcaklık algılayıcılarından aldığı verileri kendi devre kartı üzerinde bulunan anten yoluyla RF üzerinden alıcıya gönderen modüldür. Çok küçük boyutlarda (20x19 mm) tasarlanan bu modül 10 mW'lık çıkış gücüne ve 4 kB/s'lik bir veri iletim hızına sahiptir. Modülün beslemesi için ürünün kataloğunda yer alan 3 V-12 V aralığındaki çalışma gerilimi ve devrenin çektiği 4mA'lık akım bilgileri göz önünde bulundurularak uzun süreli enerji sağlayabilecek 3.7 V-3200 mAh'lık Li-ion pil tercih edilmiştir [24, 25]. Uygulamadaki çalışmalara benzer şekilde tasarlanan sistemde verici ve algılayıcı devreler aynı ortamda (işkembe içerisinde) bulunacağı dikkate alınarak tek bir baskı devre kartı üzerine monte edilmiştir. Sonra bu kart ve Li-ion pil içine sığacak büyüklükte tasarlanan kapsüle

yerleştirilerek içerisi sıvı almayacak şekilde kapatılmıştır. Sonuç olarak büyükbaş hayvanın iştahından pH ve sıcaklık bilgisini alıcı yoluyla dış ortamdaki Arduino programlama kartına aktaracak bir iştah içi parametre ölçer tasarlanmıştır. Şekil 4' te hem tasarlanan kapsül hem de baskı devre kartına monte edilen TRY414.92 pH algılayıcısı ve DS18B20 sıcaklık algılayıcısına ait resimler gösterilmiştir.



Arduino programlama devresi üzerine takılı olan alıcı, parametre ölçerin göndermiş olduğu RF' li veriyi anteni üzerinden alıp çözümleyerek Arduino programlama ortamına aktaran modüldür. Modül 5 V' luk bir Doğru Akım (DA) gerilimi ile çalışmakta olup, 105 dB' lik bir gürültü hassasiyetine sahiptir [25].

3.3. Seri Wi-Fi devresi (Serial Wi-Fi circuit)

Seri Wi-Fi devresi, iştah içi pH ve sıcaklık verilerini WEB ara yüzü, Thingspeak ve veri tabanına aktarılabilmesi yada BM denetleyicinin ürettiği ölçüm süresi sonuçlarını parametre ölçerin uyku modunu yönetmek üzere Arduino programlama ortamına aktarılabilmesini sağlamak için Wi-Fi hattı ile iletişim kuran bir arabirimdir. Tasarlanan sistemde seri Wi-Fi devresi olarak Şekil 5' te verilen ESP8266 modülü kullanılmıştır.



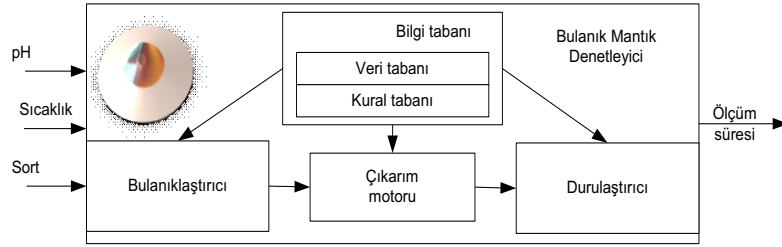
Şekil 5. ESP8266 Wi-Fi modülü (Fuzzy Logic (FL) controller)

Veri transferinde hiper-metin transfer protokolünü (http) kullanan ESP8266 modülü, düşük maliyetli ve düşük güç tüketimine sahip bir donanımdır. Bu modüller piyasada özellikle Arduino ile uyumlu bir donanım olarak tanıtılsa da, üzerinde bulunan 32 bit merkezi işlem birimi ve dışarı ile bağlantı kurmaya olanak sağlayan GPIO pinleri sayesinde her hangi mikrodenetleyiciye ihtiyaç duymadan da bağımsız olarak çalıştırılabilir [26]. Bilgi alış verişi sırasında iletişim kopukluğu önleme adına ESP8266 modüllerin donanım kurulmadan önce güncellenmesi gerekmektedir [27]. Güncelleme yapıp denetleyici üzerindeki kullanıcı adı ve şifreye bağlı bağlantı testi tamamlandıktan sonra modül kullanılabilir hale gelir.

3.4. Bulanık mantık (BM) denetleyici (Fuzzy Logic (FL) Controller)

BM denetleyici olarak Mamdani tip bir bulanık çıkarım modeli önerilmiştir. Bu denetleyici sistemde iştah sağlığı izleme parametrelerine bağlı olarak bir sonraki ölçümün süresine karar vermek için kullanılır. Bir başka deyişle o, sistemin iştah içi pH ve sıcaklık değerlerini hangi süre aralıkları ile ölçeceğine karar veren mekanizmadır. Bu yüzden sistemde denetleyici çıkış değişkeni olarak ölçüm süresi seçilmiştir. Bu süreye etki eden parametreler iştah içi pH seviyesi, sıcaklık seviyesi ve önceki ölçüm süreleri olduğu için pH, sıcaklık ve son 10 ölçüm süresinin ortalaması (Sort) denetleyici için giriş değişkenleri olarak atanmıştır. Denetleyiciye üçüncü giriş olarak Sort değişkeninin atanması, iştah sağlığı hakkında çok sayıda ölçüm sonucunun değerlendirmeye katılmasının anlık ölçüm sonucundan daha gerçekçi olması sebebine dayanmaktadır. Şekil 6' da MATLAB ortamında tasarlanan BM

denetleyicinin temel bileşenleri gösteren blok diyagram verilmektedir.



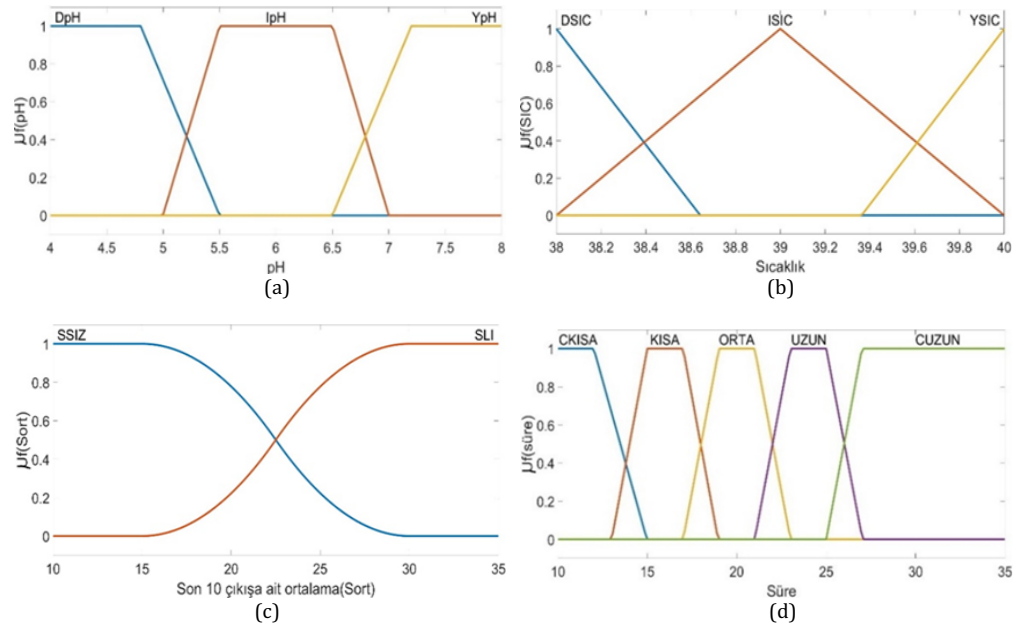
Şekil 6. İşkembe sağlığı izleme prototipi için tasarlanan BM denetleyici (FL controller designed for rumen health monitoring prototype)

BM denetleyicinin giriş ve çıkış değişkenlerini tanımladıktan sonraki süreçte giriş ve çıkış evrenlerinde tanımlanacak küme tipi, küme sayısı ve sınır değerlerine karar verilir. Literatürde büyükbaş hayvanların işkembe ile ilgili metabolizmalarının klinik incelemesi üzerine yapılan çalışmalar pH seviyesinin 5 ile 8 arasında değişebildiğini göstermektedir. Bu yüzden BM denetleyici için giriş pH evreni bu sınır değerleri arasında tanımlanmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak işkembe için pH seviyesinin 5.5-7 aralığında kabul edilebilir bir seviye olduğu belirtilmektedir. pH'ın 5 seviyesi altına düşmesinin işkembe içi sıvı durumunun aşırı asitik olmasına, 7.2 seviyesinin üzerinde olması ise ilgili sıvı durumunun aşırı bazik olmasına sebep olur. Aşırı asitik ve aşırı bazik ortamlar hayvan sağlığına zarar veren ve et ve süt verimini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Bu veriler ışığında büyükbaş hayvanın işkembe içi pH seviyesi kabul edilebilir, aşırı asitik ve aşırı bazik olmak üzere üç farklı sözel ifade ile etiketlenebilir. Biz çalışmamızda kabul edilebilir pH seviyesini IDEAL pH (IpH), aşırı asitik pH seviyesini DÜŞÜK pH (DpH) ve aşırı bazik pH seviyesini YÜKSEK Ph (YpH) olarak etiketledik. Yukarıda verilen pH değerlendirmeleri kapsamında bu parametrenin belirli değer aralıklarında sadece üç etiketten birine ait olduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzden pH girişi için Şekil 7. a' da gösterildiği gibi yamuk tipi üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir.

Büyükbaş hayvanın işkembe içi ideal sıcaklığı normal vücut ısısından 1 C° daha fazladır. Bu 39 C° karşılık gelmekte olup, normal pH değişimleri bu sıcaklık değerini önemli oranda değiştirmez. Ani pH değişimlerinde bile bu değerdeki değişimler 1 C° geçmez. Bu yüzden BM denetleyicinin sıcaklık girişi, tepe noktası 38 C° ile 40 C° arasındaki tam değerlere karşılık gelen üçgen tipi üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı üç bulanık küme ile temsil edilmiştir. Kümelerin isimleri ise DÜŞÜK SICAKLIK (DSIC), IDEAL SICAKLIK (ISIC) ve YÜKSEK SICAKLIK (YSIC) olarak etiketlenmiştir. Şekil 7.b' de sıcaklık girişi için tanımlanmış üyelik fonksiyonları verilmiştir.

BM denetleyicinin girişine uygulanan son 10 ölçüm süresinin ortalaması (Sort) bize işkembenin 10 ölçümlük süreçte ortalama pH dengesi ile ilgili bir bilgi sunar. Sistem hayvanın sağlıklı olduğu dönemlerde işkembe içi pH seviyesi normal olduğu için daha uzun aralıklar ile (≥ 30 dakika), sağlıksız olduğu dönemlerde ise işkembe içi pH dengesi bozuk olduğu için daha kısa aralıklar ile (≤ 15 dakika) ölçüm alarak hem hayvanın sağlığını korumayı hem de ölçüm sisteminin daha az enerji tüketimine sahip olmasını hedefler. Bulanık mantık denetleyicilerin bilgi tabanlarının doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip olması onların çıktılarının da doğrusal olmayan bir karakteristik sergilemesine neden olur. Bu bilgiler ışığında Sort girişi, Şekil 7. c' de gösterildiği gibi doğrusal olmayan yapıya sahip sigmoid üyelik fonksiyonu üzerinden SAĞLIKLI (SLI) ve SAĞLIKSIZ (SSIZ) olmak üzere iki bulanık küme ile temsil edilmiştir. İlk bilgi üzerinden BM denetleyicisinin çıkışı, yamuk tip üyelik fonksiyonları ile isimleri ÇOK KISA (ÇKISA), KISA, ORTA, UZUN ve ÇOK UZUN (ÇUZUN) olan 5 bulanık küme ile tanımlanmıştır.

pH ve sıcaklık girişi için üçer bulanık küme ve Sort girişi için 2 bulanık küme tanımlandığı için denetleyicide girişler ile çıkış arasındaki ilişkiyi veren kural sayısı $3 \times 3 \times 2 = 18$ olarak belirlenmiştir. Girişlerden sıcaklığın sadece ani pH değişimlerinde az bir miktar değişim göstermesi sebebi ile diğer iki değişkene göre çıkışa daha az tutulmuştur. Tablo 1 tasarlanan BM denetleyici için oluşturulmuş kural tablosunu göstermektedir.



Şekil 7. Tasarlanan BM denetleyici için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları (a) Giriş değişkeni "pH" (b) Giriş değişkeni "Sıcaklık" (c) Giriş değişkeni "Sort" (d) Çıkış değişkeni "Ölçüm süresi"
(Input and output membership functions for the designed FL controller (a) Input variable "pH" (b) Input variable "Temperature" (c) Input variable "Sort" (d) Output variable "Measurement time")

Tablo 1. Tasarlanan BM denetleyicinin kural tablosu (The rule table of the designed fuzzy logic controller)

		Sıcaklık			
		DSIC	ISIC	YSIC	
pH	DpH	CKISA	CKISA	CKISA	SSIZ
	IpH	ORTA	UZUN	ORTA	
	YpH	CKISA	CKISA	CKISA	
pH	DpH	CKISA	KISA	KISA	SLI
	IpH	UZUN	CUZUN	UZUN	
	YpH	KISA	KISA	KISA	

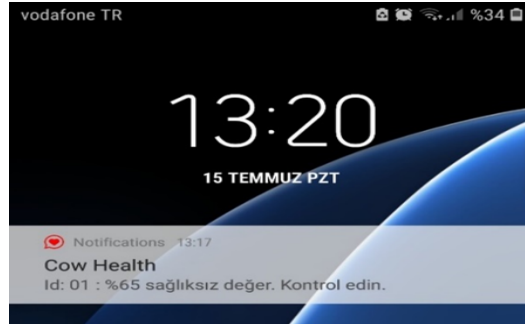
BM denetleyicilerin çıkarım işlemleri sürecinde maksimum-minimum (max-min) metodu, maksimum-çarpım (max-prod) ve maksimum drastik çarpım (max-drastic prod) gibi kuralın ateşlenme ağırlığının belirlenmesinde minimum işlemi, yerine çarpım işlemini kullanan metotlardan daha yaygın kullanılır. Durulaştırma sürecinde ise merkez (centroid) metodu doğrudan sözel çıkarım sonucunun ağırlık merkezini bulduğu için diğer durulaştırma metotlarına göre daha doğru bir sonuç üretir. Bu yüzden tasarlanan denetleyicinin çıkarım biriminde max-min metodu kullanılırken, durulaştırma biriminde merkez metodu kullanılmıştır.

3.5. pH ve sıcaklık parametrelerinin görüntülenmesi ve izlenmesi (Displaying and monitoring of pH and temperature parameters)

İşkembe içi parametre ölçerden elde edilen sonuçların görüntülenmesi, kritik değerlerin uyarı amaçlı android sistemi üzerinden, detaylı bir şekilde izleme ve grafiksel olarak analiz etme amaçlı WEB arayüzü ve Thingspeak üzerinden yapılmıştır [28].

3.5.1. Android işletim sistemi (Android operating system)

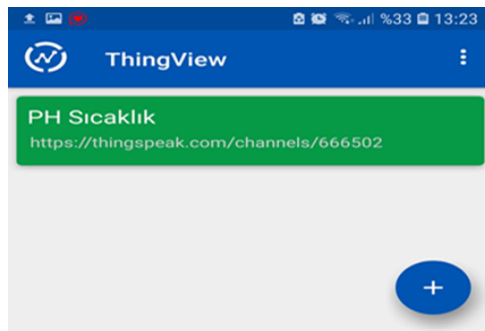
İşkembe içi parametre ölçerden elde edilen sonuçların son 20 değerinde %60 ve üzeri sağlıklı ölçümlerde veri tabanından kontrol yoluyla bu durumu belirleyen ve gerekli gördüğünde kullanıcıyı uyaran Android yazılımı geliştirilmiştir. Örnek bir uyarı bildirimi aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 8. Kullanıcıya gönderilen sağlıksız ölçüm bildirimi ekran görüntüsü
(Screenshot of unhealthy measurement notification to the user)

3.5.2. Thingspeak servisi (Thingspeak service)

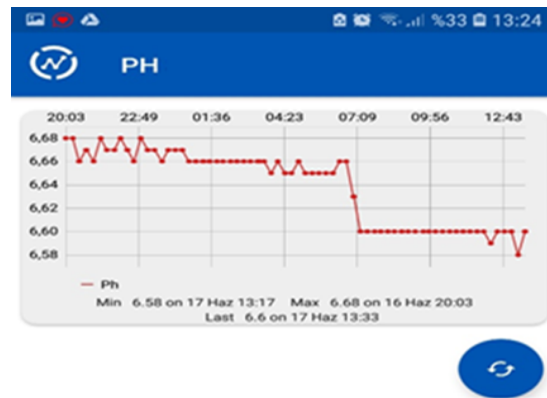
Yapılan her ölçüm aynı zamanda akıllı nesnelerin ürettiği verileri görüntülemeyi sağlayan Thingspeak servisine gönderilmektedir. Her hayvan için ayrı bir parametre ölçer kullanıldığından onların her biri için Thingspeak servisi üzerinde ayrı bir kanal açılır. Servisin ve kanalın ekran görüntüsü Şekil 9 a.' da gösterilmektedir. Servis üzerindeki kanalda tutulan verinin ham hali de Şekil 9.b' de çizelge olarak verilen resimde gösterilmektedir. Ölçümleri görülmek istenen her kanal için pH değerleri birlikte görüntülenmektedir. Kanalin ekran görüntüsü Şekil 9. c' de sunulmaktadır. Sonucu önemli olduğu düşünülen işlemler daha fazla detay bilgisi ile de görüntülenebilmektedir.



(a)

	A	B	C	D	E	F	G
1	created_at	entry_id	field1	field2	latitude	longitude	elevation,status
2	2019-01-07 16:03:39	+03,7	19.62	6.68			
3	2019-01-07 16:07:22	+03,8	19.56	6.69			
4	2019-01-07 16:18:57	+03,9	19.50	6.69			
5	2019-01-07 16:50:22	+03,10	19.37	6.68			
6	2019-01-07 17:02:40	+03,11	19.37	6.69			
7	2019-01-07 17:20:30	+03,12	19.25	6.68			

(b)



(c)

Şekil 9. Thingspeak üzerinden verilerin izlenmesi (a) Her bir hayvan için oluşturulan kanal (b) Kanallar üzerindeki ham veri (c) Bir kanal için pH ölçümleri
(Monitoring data via Thingspeak (a) Channel created for each animal (b) Raw data on channels (c) pH measurements for a channel)

3.5.3. WEB uygulaması (WEB application)

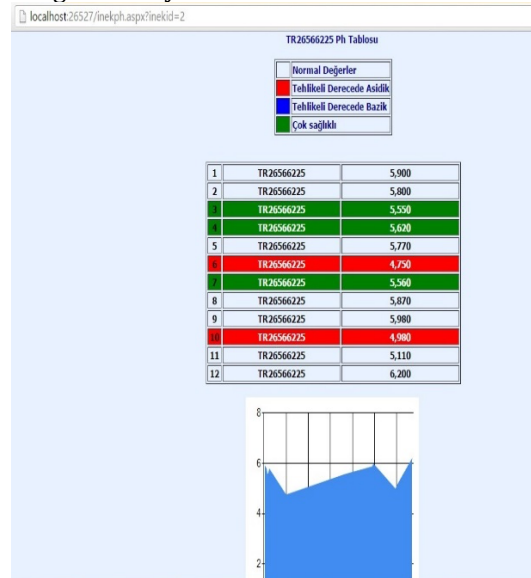
İşkembe içi parametre ölçümlerinin masa üstü bilgisayar, dizüstü bilgisayar, tablet ve cep telefonu gibi farklı dijital ortamlardan izlenebilmesi için ASP.NET ile kullanıcı adı ve şifresine sahip bir WEB uygulaması geliştirilmiştir. WEB ara yüzüne giriş yönetici ve kullanıcı olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Normal kullanıcı şifresi ile yapılan girişte Şekil 10' da gösterildiği gibi ölçüm

sonuçları küpe numaralarına göre listelenen büyükbaş hayvanların (ineklerin) sağ tarafında bulunan “pH ölçümleri için tıklayın” yazısına tıklanarak görüntülenebilir. Bu sayfa üzerinden aynı zamanda ölçüm sonuçlarını görüntüleyebilmek için küpe numarası girilerek yeni büyükbaşlar (inekler) eklenebilir. Ancak güvenlik amaçlı olarak mevcut büyükbaşların sistemden düşürülmesi site yöneticisi tarafından yönetici panelinden veya veri tabanı üzerinden gerçekleştirilmektedir.



Şekil 10. İşkembe içi pH parametre ölçümlerinin izlenebilmesi için geliştirilen WEB ara yüzü-ilk sayfa (WEB interface developed for monitoring intra-rumen parameter measurements-first page)

Küpe numaralarının listelendiği tabloda bulunan herhangi bir küpe numarası için “pH ölçümleri için tıklayın” yazısına tıkladığında 12 pH ölçümünün tablo olarak görüntülediği sayfa Şekil 11’ de gösterilmiştir. Tablonun alt kısmında ise görsel olarak değişimi daha iyi algılayabilmemizi sağlayan bir grafik yer almaktadır. Bu sayfa link ile beraber gelen büyükbaş hayvan (inek) id parametre değerini kullanmakta ve buna göre şekillenmektedir. Eğer kullanıcı bütün ölçümleri bir sayfada görüntülemek isterse kullanıcı ekranındaki “Bütün Ph ölçümleri” linkine tıklayarak bütün pH ölçümlerini (sağlıklı ölçümler dahil) bir tek sayfada görüntüleyebilmektedir.

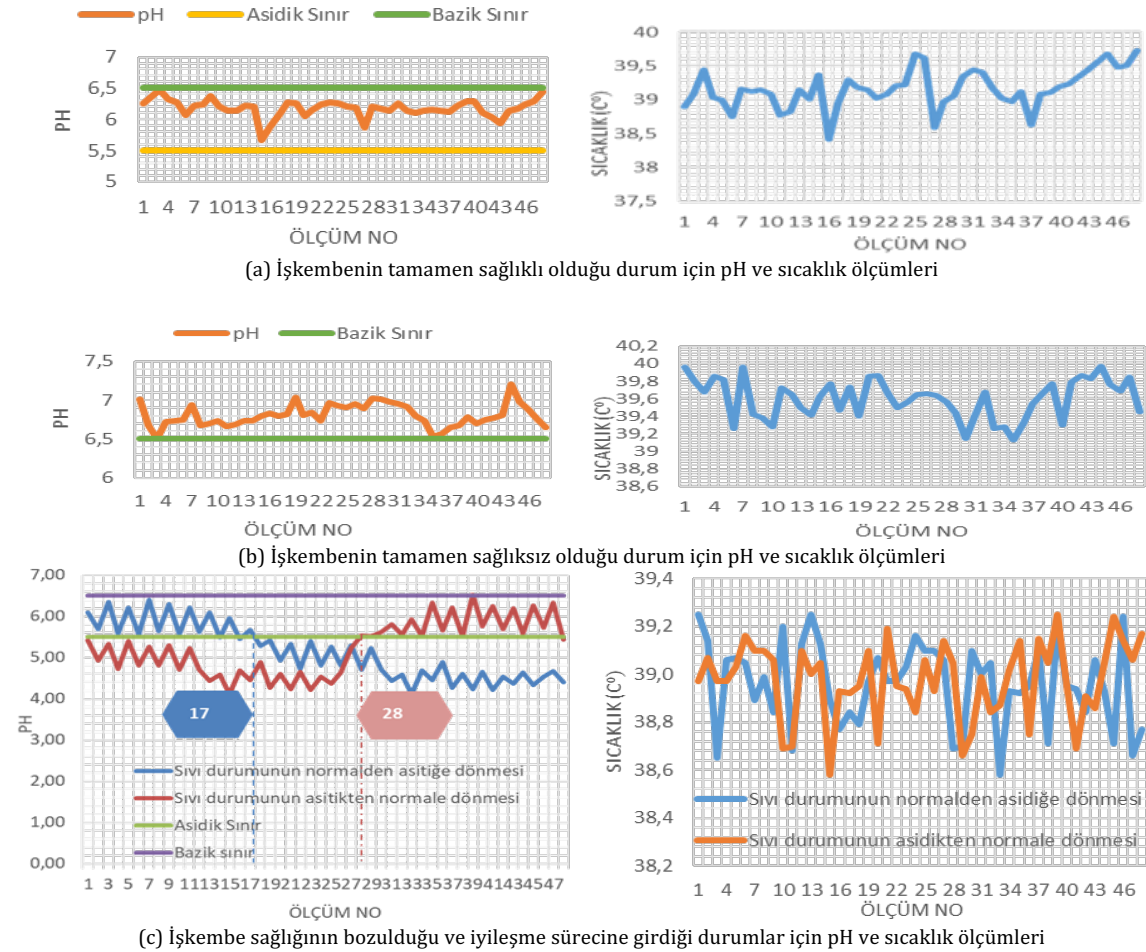


Şekil 11. İşkembe içi pH parametre ölçümlerinin izlenebilmesi için geliştirilen WEB ara yüzü-ikinci sayfa (WEB interface developed for monitoring intra-rumen parameter measurements-second page)

4. DeneySEL Sonuçlar (Experimental Results)

Sistemin canlı hayvan üzerinde kullanılması ve denenmesi etik kurul kararına bağlı olduğundan işkembe içi pH ve sıcaklık ölçümleri; büyükbaş hayvanın işkembesinin tamamen sağlıklı olduğu, sağlığının bozulduğu, tamamen sağlıksız olduğu ve iyileşme sürecinde olduğu durumları içerecek

şekilde pH dengesi değiştirilen bir kap içerisinde bulunan sıvı üzerinden yapılmıştır [28]. Şekil 12 günlük bazda BM denetleyicinin belirlediği zaman aralıklarında dört farklı durum için parametre ölçer aracılığı ile bu kap içeresinden gerçekleştirilen pH ve sıcaklık ölçümlerini göstermektedir. Şekil 12 a' daki ölçümlerden anlaşılacağı üzere tamamen sağlıklı bir hayvanda iştak içi pH seviyesi kap içerisinde 5.5-6.5 (asidik sınır-bazik sınır) aralığında değişecek şekilde ayarlanırken, sıcaklık için bu değer değişimi 38.4 ile 39.6 aralığında olacak şekilde düzenlemiştir. Şekil 12 b' deki tamamen sağlıklı bir hayvan için üretilen benzetim sonuçlarından pH değer değişimi 6.5 seviyesinin (bazik sınır) üzerinde gerçekleşirken, sıcaklık için bu değer değişimi 38.6 ile 39.7 aralığında kaldığı görülebilir.

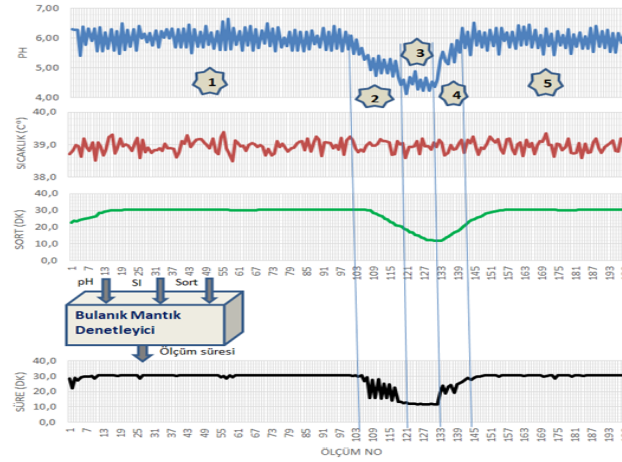


Şekil 12. Günlük bazda BM denetleyicinin belirlediği zaman aralıklarında iştakbe içi pH ve sıcaklık ölçümleri (Intra-rumen pH and temperature measurements at time intervals determined by the FL controller on a daily basis)

Sağlıklı hayvan için verilen bu pH sonucu aynı zamanda iştakbe içi sıvı değişiminin bazik olmasına da bir örnek teşkil eder. Çalışmada pH ve sıcaklık için üretilen benzetim verilerinde iştakbe içi sıvı değişiminin asidik (pH seviyesi 5.5 altında) olduğu durumu temsil eden ölçüm sonuçları da mevcuttur. Şekil 12 c' deki iştakbe sağlığının bozulduğu ve iyileşme sürecine girdiği durumlar için üretilen benzetim verilerinden mavi ile gösterilen grafikte 17. ölçüme kadar olan periyotta pH değişimi 5.5-6.5 aralığında yer aldığı için iştakbe sağlığı normalken, bu noktadan sonra iştakbe sağlığı pH seviyesinin asidik sınır 5.5' in altına inmesi ile bozulmaya başlamıştır. Aynı şekil üzerinde turuncu ile gösterilen grafikte 28. ölçümden sonra, daha önce asidik sınır seviyesi 5.5 'in altında devam eden pH değerinin sağlıklı bir iştakbede olması gereken 5.5-6.5 aralığına yerleştiği görülmektedir. Bu periyot içerisinde sıcaklık değişimleri de diğer durumların sıcaklık değişimlerinde olduğu gibi sınırlı düzeyde kalmıştır.

Parametre ölçerin güç tüketimini azaltarak onu besleyen pilin ömrünü uzatmak için önerilen BM denetleyicinin amaçlar doğrultusunda sistemin çalışmasına katkısı, iştakbe sağlığına bağlı olarak değişen farklı senaryolar şeklinde üretilen pH ve sıcaklık değerleri üzerinden test edilmiştir. Bu senaryolar büyükbaş hayvanın iştakbesinin tamamen sağlıklı olduğu, sağlığının bozulmaya başladığı, sağlığının tamamen bozulduğu, sağlığının iyileşme sürecine girmeye başladığı ve yine tamamen sağlıklı

olduğu durumlar olmak üzere 5 farklı periyodu içerir. Şekil 13' de bu periyotlardaki pH, sıcaklık ve Son 10 ölçüm süresi (Sort) girdilerine göre BM denetleyicinin ürettiği parametre ölçerin ne kadar aralıklar ile iškembeden ölçüm alacağını belirleyen süreye ait değişimler gösterilmiştir.



Şekil 13. BM denetleyicinin farklı iškembe sağlığı senaryoları altında değişen pH, sıcaklık ve Sort değerlerine bağlı olarak ölçüm süresi çıktısını elde etmesi (Obtaining the measurement time depending on the changing input parameters under different rumen health scenarios of the FL controller)

103 ölçümlük bir örneklem içeren 1. periyotta pH seviyesi tamamen sağlıklı bir iškembede olduğu gibi 5.5-6.5 aralığında değişmektedir. Sıcaklıktaki değişim ise hem bu periyot hem de diğer periyotlarda sınırlı bir değişim göstermektedir. Bu yüzden BM denetleyicinin çıkışı ağırlıklı olarak pH ve Sort parametrelerinin etkisinde kalmıştır. 1. Periyotta hem pH seviyesi hem de Sort değerindeki değişimler tamamen sağlıklı bir iškembeyi yansıttığından BM denetleyici çıktısı, bu periyottaki örneklemelerin büyük bir çoğunluğu için “sağlıklı bir iškembede daha uzun aralıklar ile ölçüm alınır” prensibine uygun bir şekilde (yaklaşık 30 dakika(dk)) elde edilmiştir. 2. Periyotta pH seviyesi hızlı bir şekilde düşerek 5.48-4.71 aralığına gelmiş ve sıvı değişimi normalden asidığe dönerek iškembe sağlığı bozulmaya başlamıştır. Bu periyotta Sort değeri de kısa bir süre sabit kaldıktan sonra pH seviyesindeki düşüşle doğru orantılı olarak düşmüştür. Girişteki değişimlere bağlı olarak BM denetleyicinin çıkışı 27.7 dk-13.1 dk aralığında değişmiştir.

3. Periyot iškembe sıvısının aşırı asidik (pH seviyesi 4.8-4.1 aralığında) hale gelerek iškembe sağlığının tamamen bozulmasına neden olduğu durum görülmektedir. Bu periyotta Sort, süre ile ilgili son 10 değerın ortalamasını temsil eden bir parametre olduğu için pH seviye değişiminde olduğu gibi belli bir aralıkta değişmeyip 2. Periyotun sonunda kaldığı yerden doğrusal bir şekilde azalarak periyodun sonuna doğru 12 dk'lık sabit değerine ulaşmıştır. Bu girdilere bağlı olarak BM denetleyici ortalama 11.9 dk'lık ölçüm süresine denk gelen “iškembe sağlığı bozulmuş bir büyükbaş hayvandan daha sık aralıklar ile ölçüm alınır” prensibine uygun bir sonuç üretmiştir. 4. Periyotta pH değeri 4.63 seviyesinden hızlı bir şekilde yükselerek 5.66 seviyesine ulaşarak iškembe sağlığının iyileşme sürecine girmesini sağlamıştır. Bu süreçte Sort' un değişim hızı pH' taki değişime göre daha yavaş kalmıştır. BM denetleyicinin çıkışı ise 11.9 dk seviyesinden hızlı bir şekilde 27.6 dk seviyesine ulaşan logaritmik bir eğri formundadır. Eğrinin orta kısımlarında pH seviyesindeki değişimlerle orantılı bir salınım vuku bulmuştur. Bununla birlikte bu salınım, 2. periyottaki iškembe sağlığının bozulmaya başladığı süreçteki salınımına göre daha düşük düzeyde kalmıştır. Son olarak 5. Periyotta ise pH seviyesi normal değer aralığına döndüğü için iškembe tamamen sağlıklı bir duruma gelmiştir. Bu periyotta BM denetleyici girişindeki değişimler hemen hemen 1. periyottaki değişimler ile aynı olduğundan denetleyicinin çıktısı da benzer şekilde oldukça ilgili periyottaki değerlere yakın değerler olarak elde edilmiştir.

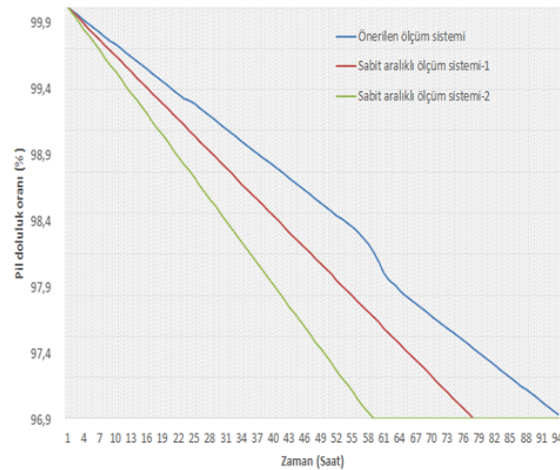
Sistemin enerji tüketimi üzerine etkisi, sabit aralıklarla ölçüm yapan iki farklı sistem ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Her iki tip sistemde de parametre ölçerin belli bir zaman dilimi için watt-saat birimi cinsinden pil üzerinden tükettiği enerjiyi ($E_{pö-et}$); bir ölçümlük enerji tüketimini (E_{1-et}), ölçüm aralığını ($t_{öa}$) ve toplam çalışma süresini ($t_{çs}$) esas alan Eşitlik 1' deki formülü kullanarak hesaplayabiliriz.

$$E_{pö-et} = 0.00155 \times \frac{1}{t_{öa}} \times t_{çs} \quad (1)$$

Burada 0.00155 katsayısı, parametre ölçerin bir ölçümlük süreçte (15 saniye) 0.372 Watt'lık ölçülen güç tüketim değeri ile süreç zamanının (15/3600 saat) çarpımı sonucu bulunan E_{1-et} değerini temsil eder. Pilin doluluk oranı, depolanmış enerji (E_{pil}) ile tüketilen enerji arasındaki farkın tekrar depolanmış enerjiye bölünmesi ile elde edilebilir. Aşağıda yüzde cinsinden pil doluluk oranını (DO_{pil}) gösteren formül sunulmuştur.

$$DO_{pil} = \frac{E_{pil} - E_{pö-et}}{E_{pil}} \times 100 \quad (2)$$

Şekil 14' te önerilen sistemin sabit aralıklarla ölçüm yapan iki farklı sistem ile pil tüketimine etkileri açısından karşılaştırılmasını gösteren grafikler verilmiştir. Sabit aralıklar ile ölçüm yapan ilk sistem (ölçüm sistemi-1: 15 dakikalık aralıklar ile ölçüm yapan sistem-yeşil grafik) ikinci sistemden (ölçüm sistemi-2: 20 dakikalık aralıklar ile ölçüm yapan sistem-bordo grafik) daha sık aralıklar ile ölçüm yaptığı için daha çok güç tüketimine sahiptir. Bu yüzden ilk sistemi kullanan pil ikinci sistemi kullanan pilden daha erken tükenecektir. Şekil 13' de verilen deneysel sonuçlardan anlaşılacağı üzere önerdiğimiz sistemin ölçüm aralığı işkembe içi ölçüm parametrelerine göre 10dk-35dk aralığında değişmektedir. İşkembe tamamen sağlıklı iken ölçüm parametrelerindeki değişime bağlı ortalama 28dk-35dk aralığında bir değer ile ölçümler gerçekleşirken, tamamen sağlıklı bir işkembe için bu değer 10dk-13.5dk arasında değişecektir. Şekil 14' den anlaşılacağı üzere toplam süre dikkate alındığında bu sürede daha uzun aralıklar ile ölçüm yapan önerdiğimiz sistemin güç tüketimi diğer iki sistemden daha azdır. Bunun sonucunda diğer iki sistemden de pili daha uzun süre kullanmaktadır.



Şekil 14. Önerilen sistemin sabit aralıklarla ölçüm yapan iki farklı sistem ile pil tüketimine etkileri açısından karşılaştırılması (Comparison of the proposed system with two different systems measuring at fixed intervals in terms of their effects on battery consumption)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada büyükbaş hayvanların işkembe içi parametre değişimlerini kablosuz olarak değişken zaman aralıkları ile alıp, aynı ağı kullanan farklı görüntüleme ve izleme ortamlarına aktaran Nİ temelli hayvan sağlığı izleme sistemi tasarlanmış ve uygulaması bir prototip üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada görüntüleme ve izleme ortamları olarak, kritik verilerin vuku bulması durumunda uyarı amaçlı android sistemi ve verileri incelemek ve analiz etmek için Thingspeak ve WEB ara yüzü kullanılmıştır. Özellikle hayvanların işkembe sağlığı ile ilgili veriler WEB ara yüzü üzerinden detaylı bir şekilde listelenebilmekte ve grafiksel olarak görüntülenip analiz edilebilmektedir.

Sistemi literatürdeki ve uygulamadaki çalışmalardan ayıran önemli bir özelliği de onun işkembe içi parametre ölçümlerini BM denetleyicinin belirlediği zaman aralıkları ile gerçekleştirmesidir. Zaman aralığı olarak ifade edilen bu süre, değeri işkembe içi parametre değişimleri ve hesaplanmış ölçüm süresi ile ilgili son 10 örneklemin ortalamasındaki değişime bağlı olarak değişmektedir. İşkembe sağlığının 5 farklı durumu dikkate alınarak bir kap içerisinde sunni olarak pH ve sıcaklık değerleri değiştirilerek oluşturulan işkembe sıvısı üzerinden alınan ölçümler ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, BM denetleyicinin işkembe sağlığının bozuk olduğu durumlarda daha kısa ve işkembenin sağlıklı olduğu durumlarda da daha uzun bir ölçüm süresi belirlediğini göstermiştir. Güç tüketimi üzerine elde edilen deneysel sonuçlardan önerilen sistemin sabit aralıklarla ölçüm yapan iki farklı sistemden daha düşük bir güç tüketimine sahip olduğunu ve buna bağlı olarak ta pilden tüketilen

enerjinin azaldığı gözlenmiştir. BM denetleyicinin sisteme olan diğer bir katkısı, hayvanının işkembe sağlığının bozuk olduğu dönemlerde daha sık aralıklar ile ölçüm alınmasını mümkün kılarak erken bilgilendirme sisteminin devreye alınmasında ortaya çıkar. Sistem, geliştirilen WEB ara yüzü sayesinde çiftçi yada veteriner hekimin hayvanın işkembe sağlığı ile ilgili geçmiş yada anlık verileri detaylı bir şekilde incelemesini olanak sağlayarak hayvan üzerinde farklı yemleme yöntemlerinin uygulanmasını da olası kılar. Bu durum hem hayvan sağlığının iyileşmesine hem de et ve süt verimliliğinin artmasına önemli katkılar sağlayabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] M. Z. Gündüz and R. Daş, "Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 327-335, 2018. doi:10.5505/pajes.2017.89106.
- [2] E. Erdal, and A. Ergüzen, "Nesnelerin İnterneti (IoT)," *International Journal of Engineering Research and Development, Special Issue of Electrical Engineering & Computer Science*, vol. 12, no. 3, pp. 24-34, 2020. doi:10.29137/umagd.827676.
- [3] A. Vahid, and O. Dağdeviren, "Nesnelerin interneti için gerçek zamanlı tasarsız veri toplama platform," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 451-462, 2020. doi:10.17671/gazibtd.745598.
- [4] S. K. Supreeth, "IoT – Wildlife monitoring, virtual fencing with deforestation notifications," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 06, no. 02, pp. 1837-1840, Feb 2019.
- [5] X. Zhou, Z. Guan, E. Zhong, Y. Zhao, Y. Dai and K. Hu, "Rare wild animal ecological monitoring system based on internet of things-a case study of western black crested gibbon," in *Proc. of 12th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Xiangtan, China, 26-27 Oct. 2019, IEEE, pp. 417-421. doi:10.1109/ICICTA49267.2019.00095.
- [6] P. Dulari, A. Bhushan, B. Bhushan and V. C. Chandel, "Internet of things (IoT) to study the wild life: a review," *Journal of Biological and Chemical Chronicles*, vol. 6, no. 2, pp. 11-15, 2020.
- [7] M. A. H. Faysal, M. R. Ahmed, M. M. Rahaman and F. Ahmed, "A Review of groundbreaking changes in the poultry industry in Bangladesh using the internet of things (IoT) and computer vision Technology," in *Proc. of 2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, Rajshahi, Bangladesh, 8-9 Jul. 2021, IEEE, pp. 1-6. doi:10.1109/ACMI53878.2021.9528235.
- [8] M. Singh, R. Kumar, D. Tandon, P. Sood and M. Sharma, "Artificial intelligence and IoT based monitoring of poultry health: a review," in *Proc. of 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*, Batam, Indonesia, 7-18 Dec. 2020, IEEE, pp. 50-54. doi:10.1109/Comnetsat50391.2020.9328930.
- [9] M. H. Memon, W. Kumar, A. Memon, B. S. Chowdhry, M. Aamir and P. Kumar, "Internet of things (IoT) enabled smart animal farm," in *Proc of 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, New Delhi, India, 16-18 Mar. 2016, IEEE, pp. 2067-2072, INSPEC Accession Number: 16426460.
- [10] B.S. Thakur and J. Sheetlani, "Analyzing a cattle health monitoring system using IoT and its challenges in smart agriculture," *Intelligent System Design. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1171, 2021, [online] Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-5400-1_79. [Accessed: Oct. 12, 2021].
- [11] K. A. Gündüz and E. T. Akyüz, "Nesnelerin interneti ve hayvancılık alanındaki uygulamalar," *Selçuk Üniversitesi Sosyal Ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, vol. 14, pp. 232-246, 2017.
- [12] C. H. Huang, P. Y. Shen and Y. C. Huang, "IoT-based physiological and environmental monitoring system in animal shelter," in *Proc. of 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Sapporo, Japan, 7-10 Jul. 2015*, IEEE, pp. 317-322. doi:10.1109/ICUFN.2015.182557.
- [13] Faruq, I. Syarif, A. S. Ahsan, M. U. H. Al Rasyid and Y. P. Pratama, "Health monitoring and early diseases detection on dairy cow based on internet of things and intelligent system," in *Proc. of 2019 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia, 27-28 Sept. 2019, IEEE, pp. 183-188. doi:10.1109/ELECSYM.2019.8901527.
- [14] A. A. Chaudhry, R. Mumtaz, S. M. Hassan Zaidi, M. A. Tahir and S. H. Muzammil School, "Internet of things (IoT) and machine learning (ML) enabled livestock monitoring," in *Proc. of 2020 IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET)*, Charlotte, NC, USA, 14-16 Dec. 2020, IEEE, pp. 151-155, doi: 10.1109/HONET50430.2020.9322666.
- [15] S. Muthumanickam, B. Keertana, L. Lavanya, S. Madhumitha and P. Sathvikaa, "Hardware implementation of health monitoring of domestic animals using RFID," in *Proc. of 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, Puducherry, India, 30-31 Jul. 2021, IEEE, pp. 1-6. doi:10.1109/ICSCAN53069.2021.9526431.

- [16] A. Zaitov, "Internet of things for monitoring grazing cattle" in Master thesis in Embedded Systems School of Information and Communication Technology, Sweden:KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Oct. 2016.
- [17] T. Xia et al., "Research and application of cow estrus detection based on the internet of things," in *Proc. of 2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, Guangzhou, China, 21-24 Jul. 2017, IEEE, pp. 665-667. doi:10.1109/CSE-EUC.2017.125.
- [18] D. Gurusamy, T. K. Elemo, E. Emare and S. A. Kamaru, "Internet of things and wireless sensor network a technological marvel in better monitoring of cows," *International Journal of Information and Computing Science*, vol. 6, no. 4, pp. 53-58, Apr. 2019.
- [19] J. Park and E. Park, "Monitoring method of movement of grazing cows using cloud-based system," *ECTI Transactions On Computer and Information Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 24-33, Apr. 2021.
- [20] C. Yoon, M. Huh, S. -G. Kang, J. Park and C. Lee, "Implement smart farm with IoT technology," in *Proc. of 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)*, Chuncheon, Korea (South), 11-14 Feb. 2018, IEEE, pp. 749-752. doi:10.23919/ICTACT.2018.8323908
- [21] A. Easwaran,, P. Arvindan, E. Dhanyasree, R. Surya and S. Selvakumar, "Internet of things enabled smart animal farm prototype," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2070, No. 1, pp. 1-10, 2021. doi:10.1088/1742-6596/2070/1/012115
- [22] E. Kandemir, "Tak-Üret modunda tek dönüştürücülü maksimum verimde çalışan şebeke bağımlı PV panel sistemi tasarımı," YL tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2015.
- [23] J. Vedashree, S. Abinaya and M. H. Kishor. "Fire monitoring system using RF modüle," *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 579-581, 2019.
- [24] "Arduino ile RF 433 MHz kablosuz iletişim modülü kullanımı," *www.kodlakafa.com*, [Online]. Available: <http://www.kodlakafa.com/arduino/arduino-ile-rf-433-mhz-kablosuz-iletisim-modulu-kullanimi>. [Accessed: Mar. 28, 2019].
- [25] "RF alıcı ve verici modül teknik özellikleri," *www.robotiksistem.com*, [Online]. Available: http://www.robotiksistem.com/rf_alici_verici_modul.html. [Accessed: Mar. 25, 2019].
- [26] A. Karacı, "Akıllı şehir hava takip sistemi ve astım hastaları için PM2.5 konsantrasyonu ölçüm aracının geliştirilmesi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 6, no. 3, pp. 418-425, Sep. 2018. doi:10.21923/jesd.412665
- [27] E. Çağatay and Ö. Z. Ali. "İş sağlığı ve güvenliği için IoT tabanlı gömülü sistem tasarımı ve uygulaması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 18, pp. 494-504, Apr. 2020. doi:10.31590/ejosat.692616
- [28] F. Gürçan, "Büyükbaş hayvanlarda işkembe sağlık durumu izleme sistemi prototipinin geliştirilmesi," YL Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Mechatronic System Design and Implementation for Liquid Level Measurement

Musa Faruk Çakır^a

Submitted: 09.02.2022 Revised : 08.04.2022 Accepted: 09.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.14

ABSTRACT

Keywords: Mechatronic system design, PID control, Liquid level control, Microcontroller

^a Çankırı Karatekin University,
Vocational School,
Electronics and Automation
18100 - Çankırı, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2406-372X

*Corresponding author:
mcakir@karatekin.edu.tr

Liquid level measurement is used to determine the height or volumetric amount of liquid in a tank. The aim is to do maximum work using minimum energy. Different types of level measurement methods are used according to the places of use. The designed and implemented system is aimed to keep the liquid level in the tank constant at the desired value. The control of the system is provided by PID (Proportional Integral Derivative) control method using a microcontroller. 16F877A is used as the microcontroller. The software of the level control is written in C language. Updating the software and examining the effect of the desired parameters on the level control were carried out with microcontroller. The detection of the liquid level was made by means of optical sensors. The level control of the liquid in the tank was carried out by controlling the pump and valve with software. A mechanism has been placed that can be controlled manually in case of an emergency. Security control is provided both electrically and mechanically. The designed and implemented system is inexpensive and can be used easily in the industry. It will also provide great benefits in electrical, electronics and mechatronics education.

Sıvı Seviye Ölçümü için Mekatronik Sistem Tasarımı ve Uygulaması

ÖZ

Sıvı seviye ölçümü, bir depoda bulunan sıvının yüksekliğinin veya hacimsel miktarının belirlenmesi amacıyla kullanılır. Amaç minimum enerji kullanılarak maksimum iş yapmaktır. Kullanım yerlerine göre farklı tip seviye ölçüm metotları kullanılmaktadır. Tasarlanıp uygulanan sistem ile depodaki sıvı seviyesi istenilen değerde sabit tutmak hedeflenmektedir. Sistemin kontrolü mikrodeneleyici kullanılarak PID (oransal-integral-türevsel) kontrol metodu ile sağlanmıştır. Mikrodeneleyici olarak 16F877A kullanılmıştır. Seviye kontrolünün yazılımı C dilinde yazılmıştır. Yazılımın güncellenmesi ve istenilen parametrelerin seviye kontrolüne etkisinin incelenmesi mikrodeneleyici ile gerçekleştirilmiştir. Depo içindeki sıvı seviyesinin algılanması optik sensörler vasıtasıyla yapılmıştır. Depo içinde bulunan sıvının seviye kontrolü; yazılım sayesinde pompa ve valfin kontrol edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir acil durum anında manuel olarak kontrol edilebilecek düzeneğe yerleştirilmiştir. Güvenlik kontrolü hem elektriksel hem de mekanik olarak sağlanmıştır. Tasarımı ve uygulaması yapılan sistem ucuz ve endüstride kolaylıkla kullanılabilir düzeydedir. Ayrıca, elektrik elektronik ve mekatronik eğitiminde büyük faydalar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Mekatronik sistem tasarımı, PID kontrol, Sıvı seviye kontrolü, Mikrodeneleyici

1. Introduction

In many areas of our lives, devices called tanks are used to store liquids. Especially, the measurement and control of the levels of solids or liquids in the tank are widely used in many areas of life. In general, the optimal level sensor selection for a particular application is based on requirements such as measuring range, liquid properties, resolution, accuracy and environment within the warehouse [1]. For example, when choosing high-accuracy level sensors in the pharmaceutical industry, there are also applications that only need an approximate level indicator, such as the water treatment system. This means that a wide range of instruments can be used according to the applications and criteria required by the user. E.g; storage of water and liquid fuel in apartment heating systems, reserve water tanks in homes. In addition, it is important that the liquids used in the industry are stored and kept ready for use. Examples such as storage of oil produced in the oil factory, storage of milk in milk storage centers, fuel tanks on ships and aircraft can be given [2]. It is also used in practice to keep the liquid at the desired temperature and level by using more than one tank [3]. It is important for safety in such systems that the liquids in the tanks are at appropriate levels. If the liquid levels in the tanks are not controlled, it can cause major accidents and waste. Level measurement in petroleum tanks is a very important issue especially in underground tanks. In addition, liquid level measurement in tanks located in places that are difficult to reach is of great importance.

The liquid level value in the tanks is generally specified in two ways as continuous level and intermittent level. At the continuous level, the level values of the tank between empty and full are indicated numerically. At the intermittent level, the liquid level in the tank is determined with the help of lighted indicators according to predetermined levels (such as empty, half, full). Liquid level control systems are executed by choosing one of these two options.

In the literature, level measurement methods are grouped as mechanical and electrical. Especially in electrical level measurement, studies have been carried out using various sensors. Capacitive [4] and ultrasonic [5,6] sensors are widely used. Ultrasonic –based sensor [7] and magnetostrictive sensor [8] are also used for liquid level measurement. The measurement resolution of the magnetostrictive level meter is sensitive up to 0.1 mm. In addition, researchers have used a conductivity-based rapid level detection technique using a new type of digital sensor called a vibrating sensor [9] and studies in this area are continuing intensively. The sensitivity of optical sensors used in system designs depends on clear light in the environment and lossless reflection values. Fiber optic sensors are widely used for level control in tanks where flammable liquid materials are used [10].

The decisions made during the product design process directly affect the product cost. Therefore, cost reduction efforts should be incorporated into the design process. The target costing system considers the design process as part of the cost. For this reason, making the systems used at affordable costs causes the production and product to be cheaper [11]. Nowadays, automatic control systems are used in many places, from the simplest application areas to the most complex industrial applications. The purpose of these control systems is to control and keep all physical and chemical variables under control without being dependent on human power. Generally, automatic control systems are examined in two groups as open-loop control system and closed-loop system [12]. The most important unit for the control system is the controller. Programmable logic controllers (PLC) [13], microcontrollers [14], digital signal processors (DSP) [15] and compact proportional-integral-derivative (PID) controllers [16] are some of the control systems used in processes.

In addition, methods such as on-off, proportional (P), proportional-integral (PI), proportional-derivative (PD) and proportional-integral-derivative (PID), which are used as control methods, are used extensively in R&D studies and production. A more successful and responsive control method should be selected in the control of the system. Particularly, there is great interest in the proportional-integral-derivative control system. Because the desired results can be obtained in a shorter time in the control method. Methods such as proportional integral derivative (PID) plus feedback controller [17], self-adjusted PID controller [18], advanced PI controller [19] with hybrid genetic adaptation have been used in system controls.

In this study, simulation studies were carried out for liquid level measurement, and software was prepared to be loaded into the microcontroller according to the results obtained. The mechanical parts of the measurement system were prepared, the necessary equipment was added and the electrical

connections were made. By performing many experiments, the most suitable control parameters were determined and the software loaded on the microcontroller was updated. Compared to other level measurement systems an easy-to-use and inexpensive level measurement system has been realized. In addition, it is thought that the study makes a great contribution to education.

2. Material and Method

In this study, 16F877A as microcontroller, optical sensors for liquid level determination, centrifugal pump as control element, solenoid valve and proportional integral derivative (PID) as control method are used. It is aimed that the elements to be used primarily in the mechatronic system design for liquid level measurement will benefit industrial and educational purposes. Centrifugal pumps are used to pressurize the liquid by converting the rotating kinetic energy of the liquid into hydrodynamic energy. The liquid enters the pump impeller along the axis of rotation, accelerates by the pump impeller and transfers the absorbed liquid to the desired section by centrifugal effect [20]. The pump is generally used to transfer liquid to the tank. Seleniod valve is the general name of the valves that are involved in the control of liquids that can be controlled (opened and closed) with an electrical signal. While the purpose of use is decisive in the valve selection, the solenoid valve should be selected according to the pressure and temperature of the fluid.

2.1. PID Control method

PID controllers are frequently used in industrial and R&D studies due to their powerful and effective performance. Each gain parameter (P, I and D) in the PID controller affects the operation of the system in which it is used. So each parameter has a different effect. Each of the blocks that make up the PID controller is managed with a gain parameter. These gain parameters receive different values for each system designed [21]. The basic control block diagram of the PID controller is given in Figure 1. In order to control any device, the output values must first be mathematically defined. The mathematical expression forms the basis of the PID controller. The output mathematical expression of the block diagram of the PID controller given in Figure 1 is given in Equation 1 [22].

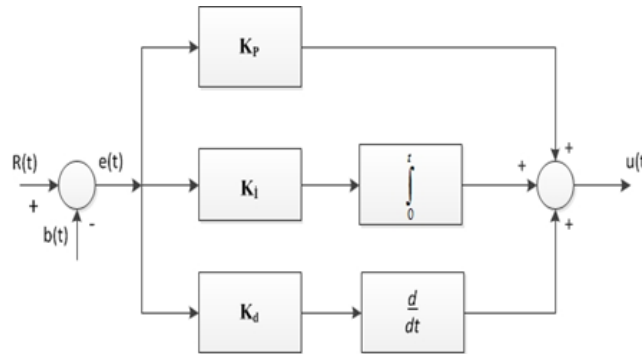


Figure 1. Block diagram of PID controller

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

As shown in the block diagram in Figure 1, the PID calculates a continuous error value $e(t)$. $E(t)$ signal is the difference between the targeted state $R(t)$ and the measured state $b(t)$. The PID controller aims to minimize the error by making the necessary adjustments and setting the control variable $u(t)$. In this way, the controller maintains the control system at the desired levels.

2.2. Design of mechatronic system

In this study, the control of the level in the tanks with liquid was carried out using a microcontroller, electronic circuits and software. In the designed and implemented mechatronic system, there is a liquid tank, level control elements used to determine the amount of liquid in the tank, and a microcontroller that controls the system. The block diagram of the system is shown in Figure 2. The liquid level system works with the software prepared and installed according to the desired criteria to the microcontroller. The important thing is that the software installed in the microcontroller is prepared accordingly to the needs. In addition, it is important that the control values can be changed via the display and keypad if

desired. The regular and synchronous operation of the software and hardware in the system is of great importance in terms of security. In case of any problem, the system automatically switches to protection. The liquid level is fixed at the desired level and the inputs and outputs to the tank are stopped.



Figure 2. Block diagram of the mechatronic liquid level measurement system

The operation of the implemented system consists of two steps. In the first step, parameters such as the liquid level value and temperature in the tank are detected by sensors and sent to the microcontroller. Optical sensors are used for level determination. The measurement accuracy of optical sensors depends on the clear and good reflection of the light in the environment in which it is used. In the second step, the microcontroller controls the centrifuge and solenoid valve through control relays in order to bring the liquid level in the tank to a predetermined level according to this incoming data. The system operates in a loop by constantly controlling the liquid level with the software installed on the microcontroller. The schematic representation of the liquid measuring system is shown in Figure 3.

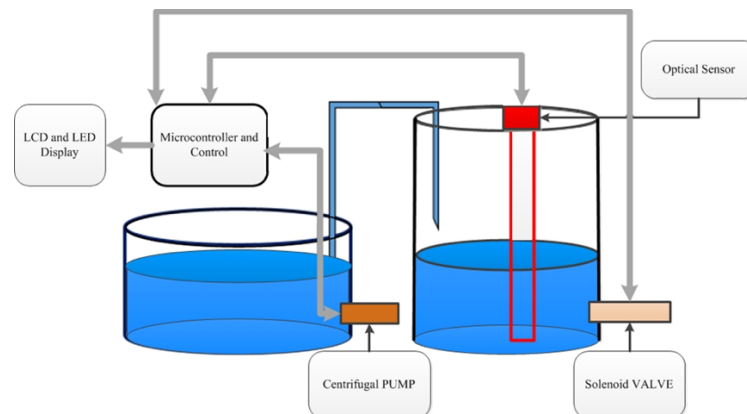


Figure 3. Schematic representation of the liquid level measurement system

2.3. Liquid level determination method of the system

To determine the level of the liquid in any tank, the amount of liquid entering and exiting the tank should be expressed mathematically. The mathematical equation is used in software that allows the system to be controlled. In addition, it is used to obtain the transfer function required for the control of the system. If the height of the liquid in the tank is h and the base area of the tank is determined as A ;

$$\begin{aligned} \text{Liquid coming out of the tank } (L_C) &= m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \\ A \cdot h &= \text{Liquid filled into the tank } (L_F) - (L_C) \end{aligned} \quad (2)$$

$$A \cdot h = L_F - m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3)$$

$$h = \frac{L_F}{A} - \frac{m}{A} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4)$$

statements are obtained. The transfer function of the system is required for PID control. The transfer function must be in the form of a single mathematical equation in terms of the input value of the output value. The transfer function obtained for liquid level measurement is given in Equation 4. The control of the system using the obtained transfer function is shown in Figure 4. The simulation of the transfer function has been done using the MATLAB program. Similar results were obtained when the simulation results were compared with the experimental results. When the simulation is run, the changes in the liquid level in the tank are observed with the aid of an oscilloscope. The responses of the system were examined and observed at the oscilloscope by changing the P, I and D (K_P , K_I and K_D) values. It is aimed to keep the liquid level constant at 50 cm in the mechatronic liquid level system. E.g; When $K_P=3.8$, $K_I=1.2$ and $K_D=0.9$ are taken, the liquid level reaches 50 cm in 20 seconds, and when $K_P=3.4$, $K_I=0.6$ and $K_D=0.1$ are selected, it reaches around 10 seconds. In Figure 5, oscilloscope images are given for different values of the PID parameters.

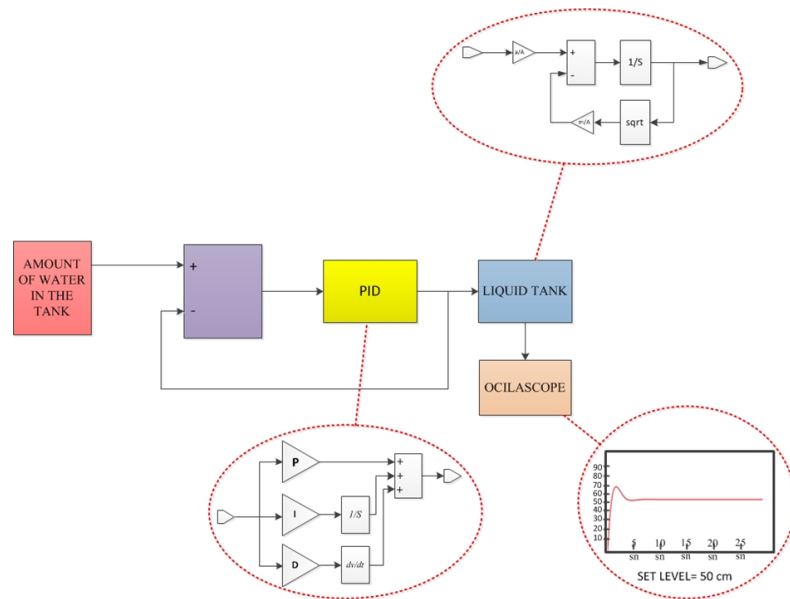


Figure 4. PID control of the liquid level measurement system

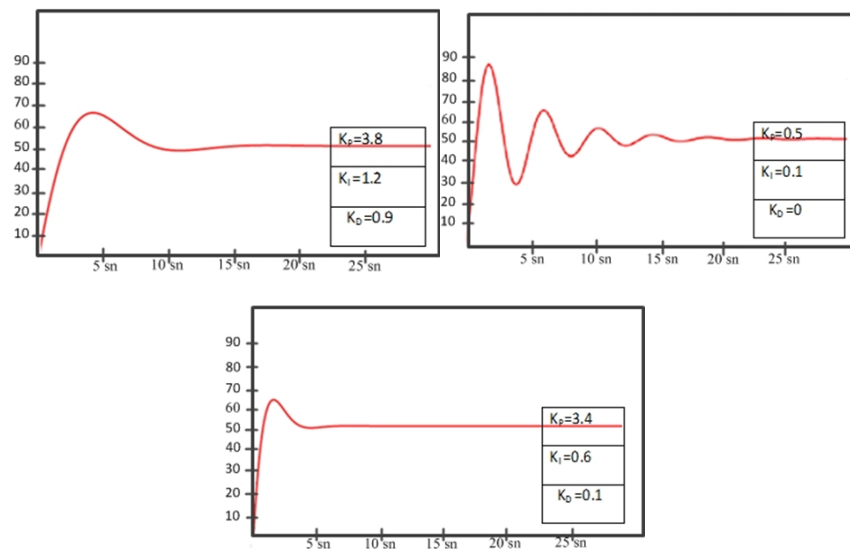


Figure 5. Simulation oscilloscope images for different K_P , K_I and K_D values

2.4. Control units of the system

The control of the mechatronic level measurement system consists of 3 units.

2.4.1. Control part

It is the card that provides information exchange between the input units and output units of the system. It activates or deactivates the control elements according to the values it receives from the input units through the sensors, via the pre-prepared and loaded software on the microcontroller. Through the LCD and sequential LED on it, instant information about the status of the system can be obtained. By means of the keys connected to the control unit, it is possible to select from the programs pre-loaded on the microcontroller. The RS-232 cable on the panel can be used when it is desired to make changes in the program. Program updates can be done by uploading new software to the microcontroller through RS-232 connection [23].

2.4.2. Sensor part

The sensors convert the physical or chemical information in their location into electrical signals and send them to the desired unit. In the liquid control system, the level data detected by the sensors connected to the tank are collected in a center and sent to the control unit by increasing the amplitude value. This unit is the unit where data collection, transformation and sending process is done. The microcontroller uses these signals and performs the desired operations through the installed software. The microcontroller is insulated with optocoupler to protect it from electrical effects and damages. Data from both the sensors and the microcontroller memory are processed in this unit.

2.4.3. Relay part

Relays provide control of large values with small electrical signal values. In the relay card, the intended elements (such as pump and valve) are controlled according to the information sent from the microcontroller. That is, the operating voltages of the elements are activated. Each relay has been given the task of controlling a different element. In addition, alarm and security units are operated via relays.

3. Designed and Performed Mechatronic Liquid Level System

The aim of this study is to determine the level of the liquid in the tank and keep it at the desired level by controlling the liquid level according to the software previously written in C language and uploaded to the microcontroller. The designed and implemented mechatronic liquid level measurement system is shown in Figure 6.



Figure 6. Mechatronic liquid level measurement system

Optical sensors have been used as liquid level sensors. These sensors are placed in a transparent glass tube inside the tank. The signals leaving the sensor to determine the liquid level and returning to the sensor must be error-free. Therefore, a water buoy is used on the liquid in the glass tube. The signals from the sensor are returned by hitting the water buoy. In this way, signal loss is prevented. The sensor detects the changes in the liquid level and transmits electrical data to the sensor card. These signals are processed in the microprocessor and control and command operations are performed in the relevant units. In addition, in case of any error in the system, liquid inlets and outlets can be controlled mechanically. The power control unit of the system and the centrifugal pump section that sends the liquid to the tank are shown in Figure 7. The pressure gauge on the pump shows the pressure at which the pump pushes the liquid into the tank.

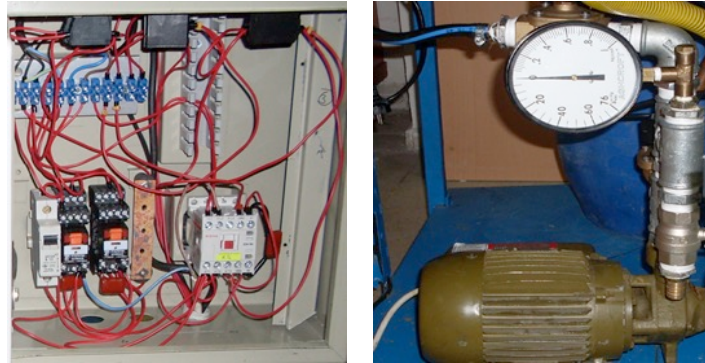


Figure 7. The power control unit of the system and the centrifugal pump

4. Results and Discussion

Mechatronic liquid level measurement system has been designed and implemented. The control of the system has been provided by PID control. The level status of the system can be brought to the desired levels at any time by changing the control parameters for PID control. In the liquid level measurement, the liquid level in the tank was determined as 50 cm. As a result of the simulations and measurements, it was seen that the most ideal values were $K_P=3.4$, $K_I=0.6$ and $K_D=0.1$. Since the design of the system requires knowledge of software, machinery and electronics, it is thought to be an example for mechatronics education and practice. It will also contribute to electrical and electronics education. It can be used easily and at a low cost in many processes in the industry.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] K. M. Deliparaschos, K. Michail, S. G. Tzafestas and A. C. Zolotas, "A model-based embedded control hardware/software co-design approach for optimized sensor selection of industrial systems" in *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE, 2015. pp. 889-894. doi:10.1109/MED.2015.7158858
- [2] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and instrumentation: Theory and Application*, Academic Press, 2012.
- [3] K. Toprak and K. E. Ouedraogo, "Performance Analysis of Thermal Storage Assisted Cooling Tower with Night Cooling," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 1027-1035, Dec. 2020. doi:10.2339/politeknik.517603
- [4] I. Dogan, "Development of a low-cost educational liquid-level sensor circuit," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 52, no. 2, pp. 168-181, 2015. doi:10.1177/0020720915575926
- [5] W. HongQi and L. Xia, "Design of measurement and control system for oil level of wells," in *2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, IEEE, December, 2012. pp. 1235-1237 doi:10.1109/IMCCC.2012.290
- [6] S. Farminster, "Measurements in Sensor Network based Oil Monitoring Control," *International Journal of Computer Applications*, vol. 110, no. 2, 2015. doi:10.5120/19290-0714
- [7] Jian-long, L. E. I. "Meter based on ultrasonic to measure the liquid-level," *Instrument Technique and Sensor*, vol. 6, pp. 21-23, 2004.
- [8] Li, Y., Sun, L., Jin, S., & Sun, L. B. "Development of magnetostriction sensor for on-line liquid level and density measurement,"

in 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, vol. 1, IEEE, June 2006. pp. 5162-5166. doi:10.1109/WCICA.2006.1713375

[9] Malathi, N., et al. "Level monitoring system with pulsating sensor—Application to online level monitoring of dashpots in a fast breeder reactor," *Review of Scientific Instruments*, vol. 86, no. 2, 2015. doi:10.1063/1.4906817

[10] Golnabi, Hossein. "Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, no. 5, pp. 801-812, 2004. doi:10.1016/S0143-8166(03)00035-6

[11] N. Yüksel, H. R. Böklü and O. Erden, "Değer Mühendisliği Uygulaması: Köfte Yapma Makinası Tasarımı," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 95-104, Aug. 2020. doi:10.30855/gmbd.2020.02.01

[12] I. A. Odigwe, O. O. Ologun, O. Olatokun, A. A. Ayokunle, A. F. Agbetuyi, and S. A. Isaac, "A microcontroller-based active solar water heating system for domestic applications," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 3, no. 4, pp. 837-845, 2013. doi:10.20508/ijrer.v3i4.871.g6212

[13] A. Lozano-Nieto, "Microcontroller-based experiments for a control systems course in electrical engineering technology," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol.51, no.1, pp. 43-53, 2014. doi:10.7227/IJEEE.51.1.4

[14] A. Mikrajuddin and M. Budiman, "Home-made PIC 16F877 microcontroller-based temperature control system for learning automatic control," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 19 no. 1, pp. 10-17, 2011. doi:10.1002/cae.20283

[15] D. Beşir, "An integrated electrical drive control laboratory: Speed control of induction motors," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 20 no. 3, pp. 410-418, 2012. doi:10.1002/cae.20407

[16] A. Usha, H. P. M. Tech and K. L. Narayana, "Water tank level control system using self-adaptive fuzzy-PID control," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 1992-1997, 2014.

[17] L. Consolini, G. Lini, A. Piazzini and A. Visioli, "Minimum-time rest-to-rest feedforward action for PID feedback MIMO systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 3, pp. 217-222, 2012. Doi:10.3182/20120328-3-IT-3014.00037

[18] K. K. Tan, R. Ferdous and S. Huang, "Closed-loop automatic tuning of PID controller for nonlinear systems," *Chemical engineering science*, vol. 57, no. 15, pp. 3005-3011, 2002. doi:10.1016/S0009-2509(02)00186-0

[19] S. M. Nawi, A. N. Abdalla and M. S. Ramli, "Improved coupled tank liquid levels system based on hybrid genetic-immune adaptive tuning of PI controller," in *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE), Pahang, Malaysia, June 21-22, 2011*, IEEE, pp. 247-252, 2011. doi:10.1109/INECCE.2011.5953885

[20] J. F. Gülich, *Influence of the medium on performance*, Centrifugal Pumps. Berlin: Springer, 2010.

[21] S. Ekinci, B. Hekimoğlu and E. Uysal, "PID Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Parametrelerinin Belirlenmesi için Böbrek-ilhamlı Algoritma," *Politeknik Dergisi*, vol. 22, no. 2, pp. 453-460, Jun. 2019. doi:10.2339/politeknik.417765

[22] G. Yüksek, A. N. Mete and A. Alkaya, "PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 1111-1119, Dec. 2020. doi:10.2339/politeknik.603344

[23] H. Gökçe, M. Yavuz and M. Karayel, "İmalat Süreçlerinde Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesi Amaçlı Dinamometre Tasarımı ve İmalatı," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 27-32, Aug. 2017.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Sound Analysis to Recognize Cattle Vocalization in a Semi-open Barn

Güzin Özmen^a, İlker Ali Özkan^b, Şeref İnal^c, Şakir Taşdemir^d, Mustafa Çame^e,
Emre Arslan^f

Submitted: 21.12.2021 Revised : 08.04.2022 Accepted: 11.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.15

ABSTRACT

Keywords: Cattle vocalization, FFT, Sound analysis, Spectrogram, Welch

^a Selcuk University,
Technology Faculty,
Dept. of Biomedical Engineering
42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3007-5807

^b Selcuk University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5715-1040

^c Selcuk University
Faculty of Veterinary Medicine
42003 Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4746-8930

^d Selcuk University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2433-246X

^e Selcuk University
Faculty of Veterinary Medicine
42003 Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1821-191X

^f Selcuk University
Faculty of Veterinary Medicine
42003 Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4609-8395

*Corresponding author:
gozmen@selcuk.edu.tr

In precision livestock, there has been a growing demand for innovative tools that collect and analyze information about individual animals. For this purpose, various variables of precision livestock such as monitoring the general condition of animals, activity and health status, food intake, or estrous activity are measured by using information technology. In recent years, the requirement for sound analysis to be used in these systems has increased. Because collecting sound signals do not require animal intervention. Dairy cattle make different sounds in cases of illness, pregnancy, feeding, etc., and by using sound signals, the diagnosis and status determination of the animal can be made. The aim of this study is to record the vocalization data of a dairy cattle in a semi-open barn and to investigate its differences from other barn sounds. It has been revealed that the frequency ranges of cattle, environment, bird, and machine sounds, which are analyzed by time domain, frequency domain, and spectrogram, are different and these differences can be used in a cattle identification system.

Yarı-açık bir Ahırda Sığır Vokalizasyonunu Tanımak için Ses Analizi

ÖZ

Hassas hayvancılıkta, hayvanlar hakkında bilgi toplayan ve analiz eden yenilikçi araçlara yönelik artan bir talep vardır. Bu amaçla, hayvanların genel durumlarının izlenmesi, aktivite ve sağlık durumu, gıda alımı veya kızgınlık aktivitesi gibi hassas hayvancılığın çeşitli değişkenleri bilgi teknolojileri kullanılarak ölçülür. Son yıllarda bu sistemlerde kullanılacak ses analizlerine olan ihtiyaç artmıştır. Çünkü ses sinyallerini toplamak hayvan müdahalesi gerektirmez. Süt sığırları hastalık, hamilelik, beslenme vb. durumlarda farklı sesler çıkarır ve ses sinyalleri kullanılarak hayvanın teşhis ve durum tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmanın amacı, ahırda bulunan bir süt sığırının vokalizasyon verilerini kayıt altına almak ve diğer ahır seslerinden farkını araştırmaktır. Zaman domen, frekans domen ve spektrogram ile analiz edilen sığır, ortam, kuş ve makine seslerinin frekans aralıklarının farklı olduğu ve bu farklılıkların bir sığır tanımlama sisteminde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sığır sesi, HFD
Ses analizi, Spektrogram, Welch

1. Introduction

One of the fields where the information technologies that have developed in recent years have benefited is livestock. The use of these technologies greatly improves livestock welfare enhancement, animal health monitoring, timely detection, and control of diseases [1]. Automated tools are being developed that use video and audio information to control and monitor the behavior and biological responses of animals and to develop an early warning system [2]. Recently, technology-based research is carried out for different situations such as identification of dairy cattle, estrous monitoring, yield status monitoring, diagnosis, follow-up, and treatment of diseases. Some of these studies include those who use physiological data [3], location and acceleration data [4], barcode obtained with video data [5], or sound data [6] or with an integrated video-sound system [7].

Sound data contains information about different states and intentions of animals [8]. Also, most animal species have vocal characteristics such as growling, barking, howling, whining, screaming. In the literature, there are studies using vocalization data of animals such as cat [9], dog [10], [11] bird [12] there are also vocalization studies of animals such as sheep [13], dairy cattle [7], [14] which living in farm/barn. Dairy cattle make sounds that involve different situations and intentions. These sounds are not completely meaningless, although they do not contain definite meanings involving a subject or concept. Cattle make sounds that probably make sense to other cattle. Dairy cattle have vocal sound characteristics. In general, vocalization behavior in cattle is examined more as an indicator of welfare [15]. As a means of socialization, cattle use their calls to communicate, to meet and react, to show fear and threat, as well as to show affection [16]. During the estrous period, the vocalization of cattle increases but this is not exact for vocalization number [17]. In particular, cattle showing abnormal estrous, call at low frequency and violently [15]. Schön et al. [18] showed that the estrous climax caused an increase in the vocalization rate using sound data they recorded with the neck microphone from the German Holstein heifers. Chung et al. [6] extracted the Mel frequency cepstrum coefficients from the voice data of Korean domestic cows and performed early anomaly detection with support vector machines. They detected estrous with over 94% accuracy. Lee et al. [19] created a formant-based feature subset selection algorithm using a spectrogram of Korean native cow vocalization for the detection of cow estrous vocalizations. They achieved an average detection accuracy of 97.5% with the AdaBoost.M1 using real vocalizations from a barn. Ding et al. [20] aimed at detection of rumination sound in dairy cows, they achieved this goal with an accuracy of 97% using zero cross ratio (ZCR), Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) and Dynamic time warping (DWT) algorithms. Jung et al. [21] obtained Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) from cattle sounds filtered by short-time Fourier transform using 12 sound sensors and they designed a Real-Time Livestock Monitoring System that provides 94.18% classification accuracy using a convolutional neural network (CNN) model. Bishop et al. [22] in order to classify and characterize animal sounds in livestock, first demonstrated the differences between sounds such as noise, wind, machinery, bird sounds in the environment, and the sounds they wanted to examine using the spectrogram method. And in the automatic segmentation of cattle, sheep, and dog sounds, they also took these sounds into account. The literature shows that there are studies aiming to detect cattle vocalization and to obtain information about the status of cattle from differences in cattle vocalization. The vocalization of cattle living in a semi-open barn can be recorded with a voice recorder to be worn around their neck. However, due to situations such as the cattle's neck rubbing against the irons in the barn, this is a difficult task that requires follow-up. In addition, the cattle sound in the barn can be recorded with microphones integrated into the cameras. However, in this case, there is a need to determine the distinctive features of the cattle's vocalizations due to other sounds in the barn.

The semi-open barn is a very noisy place that hosts various environmental sounds as well as cattle vocalizations. These noises can consist of external factors such as bird sounds, iron sounds during feeding of cows, milking machine sound, human voices. [7]. Therefore, individual sounds should be isolated from the ambient sound in cattle sound studies. However, due to the discontinuity of these sounds, it is not easy to filter out background sounds. For this reason, visual information about the sound is used in some studies to distinguish cow sounds from others [2]. The most common method for analysing audio data and extracting features is to convert the signal into a frequency domain with the Fourier transform [23]. In addition, audio signals can be visualized with Fourier-based methods such as Spectrogram, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC). The spectrogram represents the energy in the frequency spectrum of a time-varying audio data in the frequency and amplitude spectrum, while the MFCC represents the power spectrum of the audio data on a log scale [24].

In the literature, there are studies that analyse animal sounds [25, 26] aiming at classification or automatic detection [27]. The main contribution of this study is to reveal the difference in cattle vocalization from other sounds encountered in the natural barn environment. It is also based on digital signal processing, and it is a preliminary study of automatic cattle vocalization detection. This study aims to analyse the sound data recorded with the microphone system integrated into the cameras placed at three different points in the barn and to investigate the differences of the ambient and cattle sound data with digital signal processing methods. Fast Fourier Transform (FFT), Welch and Spectrogram methods were used for the analysis of audio signals. In this study, barn sound data examined in the time domain were then analysed by time-frequency domain methods and a preliminary study of an automated vocalization recognition system to distinguish cattle sounds from barn sounds was carried out.

2. Material and Method

2.1. Data acquisition

In this study, video and sound recordings are obtained from three different cameras (front-rear and fish-eye camera) placed in the farm of Selcuk University Veterinary Faculty. Figure 1 shows the placement of the cameras, microphones and recording device on the farm. The Ethics Committee for Experimental Animal Studies of Selcuk University approved this study (2020/88).

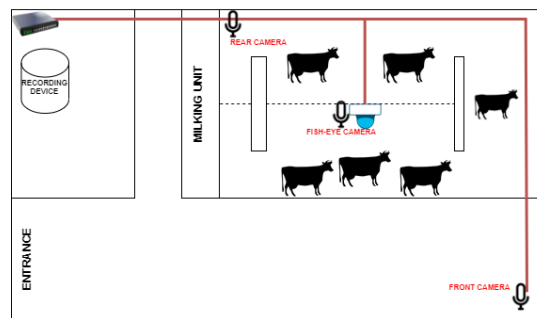


Figure 1. Layout and connection arrangement of cameras and microphones

Figure 2 shows the view on the barn after the rear camera and fisheye camera are placed. All cameras are equipped with an external microphone to get better quality sound. The setup is completed by connecting the cameras to the recording device. After the installation, it became possible to access the camera recordings directly and remotely over the internet on the DVR software. All records obtained on the farm can be accessed via web-based software over the internet and are in .DAV file format. Smart Player [28] was employed to read the .DAV files and to convert them to .AVI video file format. All .AVI files contain video data and 32-bit/16Khz mono channel audio data. .wav Audio files were extracted from the .AVI files by using MATLAB (2020) at 16 khz sampling frequency.



Figure 2. Rear Camera and Fisheye Camera View

2.2. Sound analysis

Signal analysis is used to evaluate variations in signal structure and can provide important clues to

study the sound production mechanism [29]. The frequency-domain of discontinuous signals such as sound signals provides more detailed information than the time domain content, and the frequency content of a waveform can be determined by spectral analysis methods. Spectral analysis is mainly performed by classical methods based on Fourier Transform and modern methods based on estimation of model parameters. Spectral analysis applications of noisy signals, of which only a part can be analysed (discrete-time signals), are approximate estimates of the true spectrum [30]. The power spectrum (PSD) is calculated as the square of the magnitude of the Fast Fourier Transform (FFT) of the $x(t)$ waveform and shown in Eq. (1) where $|X(f)|$ represents the energy density function over frequency.

$$PS(f) = |X(f)| \quad (1)$$

Instead of applying the FFT to the entire waveform to calculate the power spectrum, the averaging technique is often used, which improves the statistical properties [31]. The power spectrum obtained by applying FFT directly and then averaging is called averaged periodogram. The Welch approach is a widely used technique for estimating the average periodogram and is based on dividing the data into several overlapping segments, calculating an FFT on each segment, calculating the square of the magnitude, or power spectrum, then averages these spectra [30].

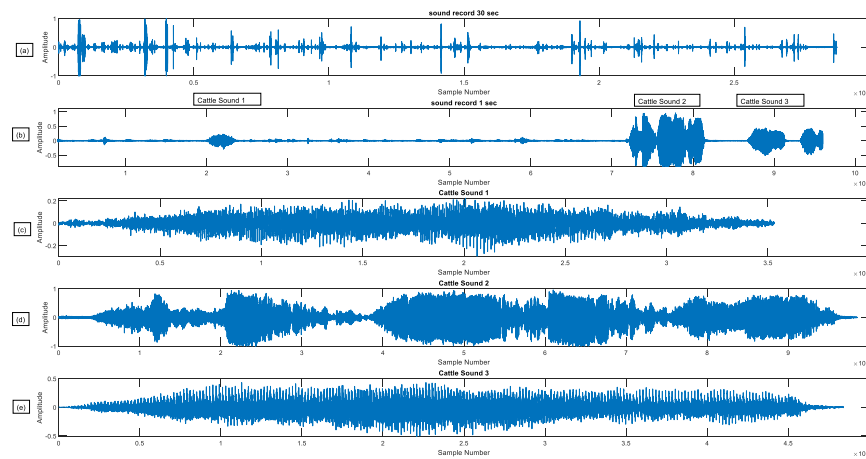


Figure 4. (a) 30 min recording containing cattle vocalizations (b) 1 min soundtrack (c) First cattle vocalization (d) Second cattle vocalization (e) Third cattle vocalization

Fourier analysis provides important information about the frequency of the wave, but it does not show in which time interval the frequencies are. So, it is a suitable method for stationary signals because the frequency of stationary signals does not change with time, but since the frequency of non-stationary signals changes with time, the information of time also needs to be considered. The methods developed to obtain both time and frequency components from the wave are divided into two as time-frequency methods and time scale methods. Short-time Fourier Transform (STFT, Spectrogram) one of the time-frequency methods, is based on the classical Fourier Transform and examines the signal in two dimensions as a function of time and frequency by using the windowing function. In this way, the non-stationary signal is divided into small segments and these segments are considered stationary. [30]. Eq. (2) shows the STFT equation of a two-dimensional function $X(t,f)$ where $w(t)$ is the sliding window function. τ represents the variable that slides the window through the waveform $x(t)$ [31].

$$X(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau - t)e^{-i2\pi f\tau}d\tau \quad (2)$$

The spectrogram (Eq.(3)) represents a real-valued, nonnegative distribution and the spectrogram of the $x(t)$ is equal to the squared magnitude of the STFT presented in Eq. (2).

$$P(t,f) = |X(t,f)| \quad (3)$$

A spectrogram provides a graph that makes time, frequency, and PSD appears on the same graph and is generally used for visualizing sound signals. In this study, the power spectrum was calculated using

the Fast Fourier Transform for a sampling frequency of 16 kHz. For obtaining the spectrogram, Hanning window with 1024 window size and 50% overlap was used.

3. Results and Discussion

This study aims to analyse cattle vocalization and other sounds in a semi-open barn. After visualizing the audio data with the Audacity audio editing program [32] the audio tracks used for this study were listened to and selected by using audio-visuals. In this study, the same date and time sounds were investigated for three cameras. According to our observations, the clearest cattle vocalization is recorded with the rear camera while the cattle is close to the camera. Besides, the front camera and fisheye camera provided low amplitude sound data because of the locations. Figure 3 shows the Audacity waveform and spectrogram of a .wav audio data recorded from the rear camera between April 2, 2021, 04.00:04.30.

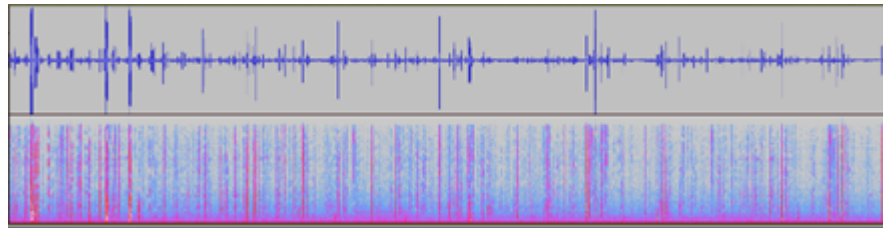


Figure 3. Audacity representation of time-domain (above) and Spectrogram (below) of 30-minute audio track

The 30 minutes of audio data shown in Figure 3 are from a time when the vocalizations of cattle were clearly detected. This audio data includes low amplitude environment sound as well as higher amplitude audio data including cattle vocalization. However, it is not always possible to obtain such clear cattle vocalization data. During the day, there are many external sounds such as metal sounds, bird vocalization (d) Second cattle vocalization (e) Third cattle vocalization sounds, milking machine sounds in the barn, and the cattle generally call very rarely. In Figure 4, the 30-minute soundtrack given in Figure 3, the first one-minute part containing 96000 samples and the amplitude values of the three full cattle vocalization data of this piece presented according to the number of samples. Here, the 1st and 3rd cattle sound data consist of a single vocalization, but there are 3 significant vocalizations in the 2nd cattle sound data. By examining the audio track in Figure 4 in the frequency domain, the power spectrums seen in Figure 5(b) were obtained. To evaluate the audio signals with the power spectral density (PSD) on the time-frequency scale, spectrograms of the signals were obtained in Figure 5 (c). Each sound used in this study has different times to complete its own characteristic. For example, a typical cattle vocalization took 2.5 seconds, while a single bird sound takes 500 ms. Machine sound and the environment sound was analysed for longer time.

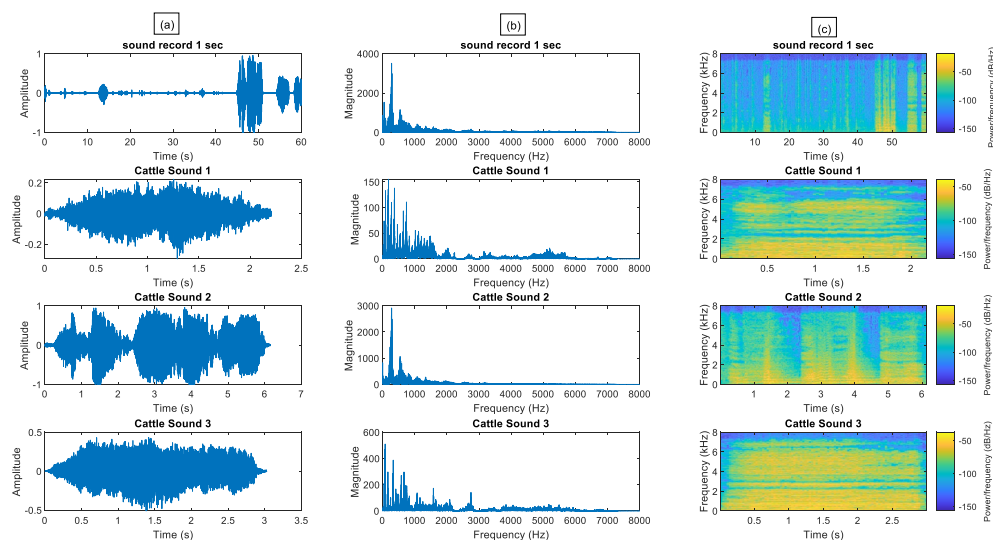


Figure 5. Cattle vocalization analysis represented in (a) time-domain (b) frequency-domain (c) spectrogram

In a spectrogram representation, the x-axis indicates the time the y-axis is frequency, and the colors indicate the PSD. In 3 different vocalizations of the same cattle, shown in Figure 5' (c), bright colors represent strong frequencies. According to the spectrograms, frequencies below 1kHz are strong, although there is little variation at high frequencies. This situation is also seen in the frequency spectrum given in (b). The amplitude, frequency, and spectrogram graphs of three different environment sounds that reflect the general condition of the barn, which are obtained from the same 1-minute soundtrack contains with occasional low-amplitude metal sound but do not contain any extra noise are shown in Figure 6. In addition, amplitude, frequency and spectrogram graphs of bird sounds (Figure 7) and machine sounds (Figure 8) obtained from a 30-minute soundtrack recorded from the rear camera between 23.29:23.59 of April 5, 2021 are presented. From the typical barn sounds presented in Figure 5-6-7-8, cattle, birds, environment, and machine sounds show different characteristics from each other. However, an automatic solution is needed to detect these sounds in hard barn conditions and to detect their differences and use them in an automated cattle voice recognition system.

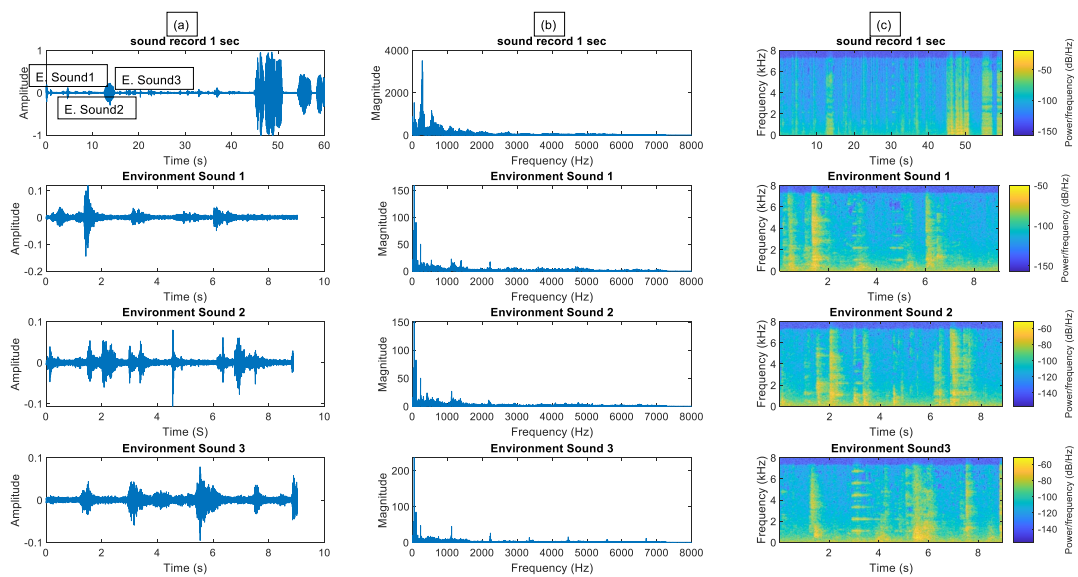


Figure 6. Environment sounds analysis represented in (a) time domain (b) frequency domain (c) spectrogram

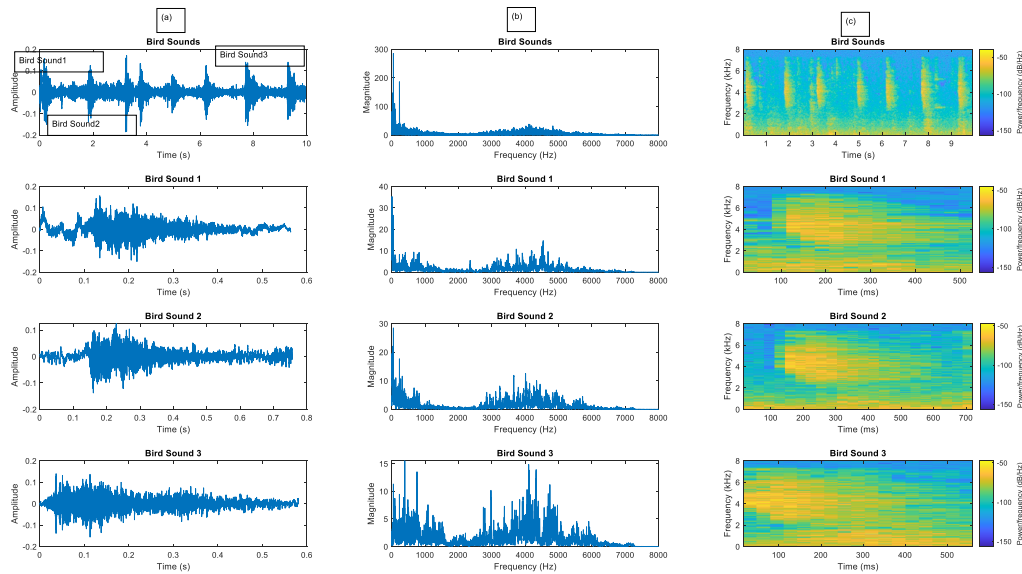


Figure 7. Bird sounds analysis represented in (a) time domain (b) frequency domain (c) spectrogram

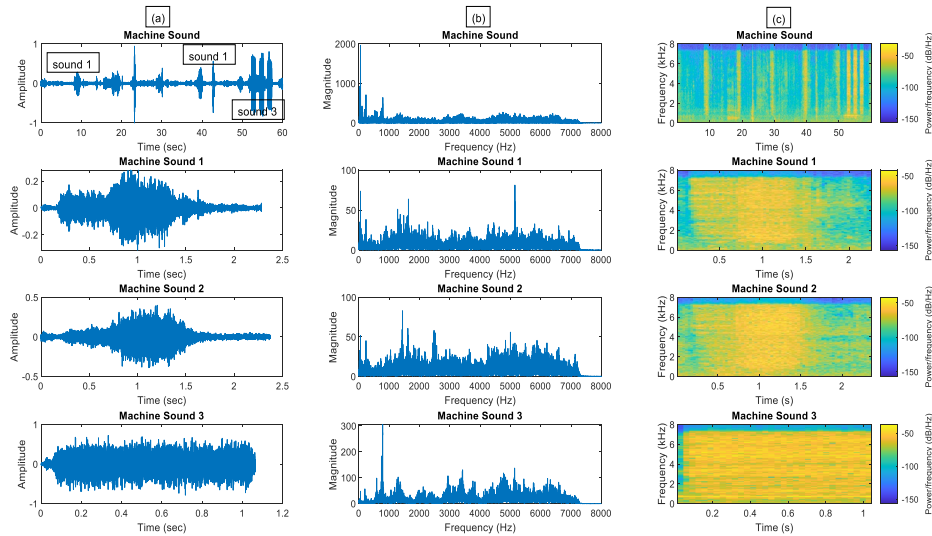


Figure 8. Machine sounds analysis represented in (a) time domain (b) frequency domain (c) spectrogram

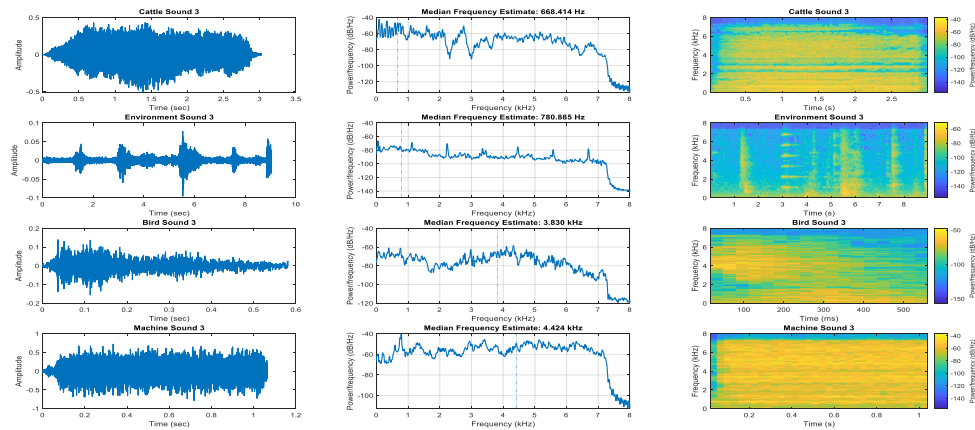


Figure 9. Cattle -Environment- Bird- Machine sounds time domain, PSD with median frequency and spectrogram graphs

The amplitude, PSD, and spectrogram graphs of different soundtracks in the barn are presented in Figure 9. The median frequency was calculated using one sound from each of the Cattle-Environment-Bird-Machine sounds. The PSDs of the sound data were calculated by the Welch method using the same parameters in the spectrogram. In addition, in Figure 9 (b), the median frequency values of each sound data are plotted on the PSD. In Figure 9, the median frequency value of a typical vocalization of cattle, calculated for each sound data and shown in the power spectrum, was found to be 668.414 Hz. Environment median frequency is very close to this value at 780.885 Hz, but this situation differs in the spectrogram. The median frequency of the bird sound is at 3.83 kHz and the machine sound is at 4.424 kHz, which has much higher than the cattle sound.

Table1. Average median and mean frequency of the barn sounds

Sounds	Median Frequency (Hz) $\pm$ std	Mean Frequency (Hz) $\pm$ std
Cattle Sound	525.376 $\pm$ 209.052	826 $\pm$ 364
Environment Sound	851.939 $\pm$ 239.571	1369 $\pm$ 188.471
Bird Sound	3512 $\pm$ 292.890	2697 $\pm$ 297.214
Machine Sound	4047 $\pm$ 518.063	3749 $\pm$ 245.864

Table 1 presents the average median and average mean frequency values of the sounds used in this study. Also Figure 10 shows the graphical representations of the values. The average median and mean frequency were calculated using three sounds from each of the Cattle-Environment-Bird-Machine sounds. Among the sounds recorded for this study, cattle sounds have the lowest median and mean

frequencies as seen from Table 1. According to the spectrograms, the cattle's vocalization is strong below 1 kHz, the environment sound is between 1 kHz and 2 kHz, the bird's sound is in the range of 3 kHz-4 kHz, and the machine sound is greater than 4 kHz.

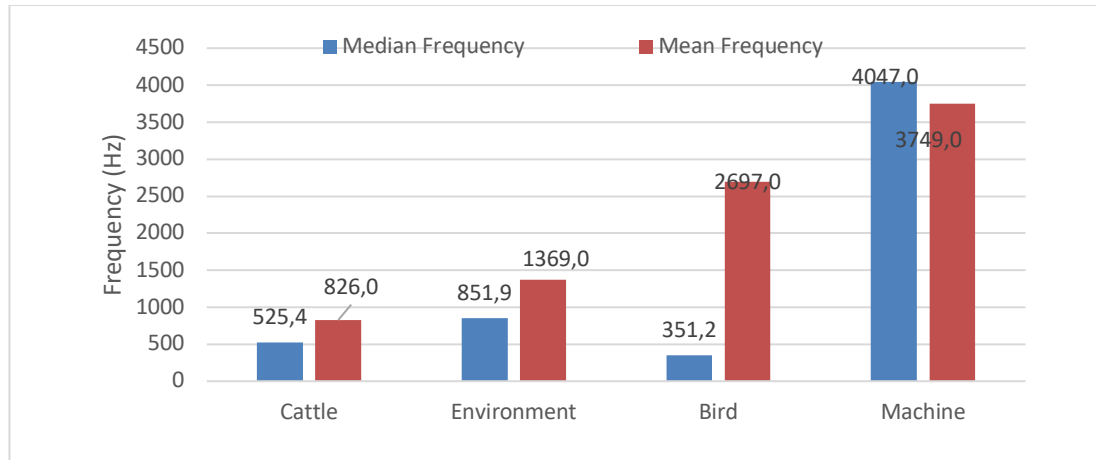


Figure 10. Graphical representations of the frequency values

4. Conclusion

The data used in this study were collected from a real barn environment with hard conditions, and the audio files recorded during the day were examined and the most specific ones were selected. It is known that the sound frequency of a dairy cattle is lower than 5 kHz [8]. The frequency range may vary for different conditions of the cattle. In this study, the typical sounds that occur in the barn during the day were examined and it was shown that the cattle's vocalization was in a frequency range that could be distinguished from other sounds. This study will lead an automated cattle vocalization recognition study with the audio data from the barn. Besides, with the increase in the number of data, creating labeled data, firstly separating the cattle's vocalization from the ambient sounds, and then obtaining information about the cattle's condition from the detected cattle vocalizations are among the future studies.

Acknowledgment

This study is supported in part by the Scientific Research Projects Coordination of Selcuk University via grant number 20401052.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] T. R. Beckham and L. K. Holmstrom, "The Use of Information Technology in Animal Health Management, Disease Reporting, Surveillance, and Emergency Response," *83rd General Session World Assembly: World Organisation for Animal Health*, vol. 33, pp. 1-15, 2015.
- [2] E. Tullo, I. Fontana, and M. Guarino, "Precision livestock farming: an overview of image and sound labelling " in *Proceedings of 6th European Conference on Precision Livestock Farming, ECPLF 2013, September, 2013, Leuven, Belgium*, pp. 30-38, Available: <https://air.unimi.it/handle/2434/228259>. [Accessed: 10 Jan. 2022].
- [3] V. C. Dalcin et al., "Physiological parameters for thermal stress in dairy cattle," *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 45, no. 8, pp. 458-465, Aug. 2016. doi:10.1590/S1806-92902016000800006
- [4] J. Wang, M. Bell, X. Liu, and G. Liu, "Machine-learning techniques can enhance dairy cow estrus detection using location and acceleration data," *Animals*, vol. 10, no. 7, pp. 1-17, 2020. doi:10.3390/ani10071160
- [5] S. Stankovski, G. Ostojic, I. Senk, M. Rakic-Skokovic, S. Trivunovic, and D. Kucevic, "Dairy cow monitoring by RFID," *Scientia Agricola*, vol. 69, no. 1, pp. 75-80, Feb. 2012. doi:10.1590/S0103-90162012000100011
- [6] Y. Chung, J. Lee, S. Oh, D. Park, H. H. Chang, and S. Kim, "Automatic detection of cow's oestrus in audio surveillance system,"

Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, vol. 26, no. 7, pp. 1030–1037, 2013. doi:10.5713/ajas.2012.12628

[7] V. Röttgen et al., “Automatic recording of individual oestrus vocalisation in group-housed dairy cattle: Development of a cattle call monitor,” *Animal*, vol. 14, no. 1, pp. 198–205, 2020. doi:10.1017/S1751731119001733

[8] G. Jahns, W. Kowalczyk, and K. Walter, “Sound Analysis to Recognize Different Animals,” in *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 30, no. 26, pp. 169–173, 1997. doi:10.1016/s1474-6670(17)41265-1

[9] A. Urrutia, S. Martínez-Byer, P. Szenczi, R. Hudson, and O. Bánszegi, “Stable individual differences in vocalisation and motor activity during acute stress in the domestic cat,” *Behavioural Processes*, vol. 165, pp. 58–65, Aug. 2019. doi:10.1016/j.beproc.2019.05.022

[10] C. Y. Yeo, S. A. R. Al-Haddad, and C. K. Ng, “Dog voice identification (ID) for detection system,” in *2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications, ICDIPC 2012*, no. Id, pp. 120–123, 2012, doi:10.1109/ICDIPC.2012.6257264

[11] C. Y. Yeo, S. A. R. Al-Haddad, and C. K. Ng, “Animal voice recognition for identification (ID) detection system,” in *Proceedings - 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2011*, no. Id, pp. 198–201, 2011, doi:10.1109/CSPA.2011.5759872

[12] A. Urrutia, S. Martínez-Byer, P. Szenczi, R. Hudson, and O. Bánszegi, “Stable individual differences in vocalisation and motor activity during acute stress in the domestic cat,” *Behavioural Processes*, vol. 165, pp. 58–65, Aug. 2019. doi:10.1016/j.beproc.2019.05.022

[13] J. C. Bishop, G. Falzon, M. Trotter, P. Kwan, and Paul. D. Meek, “Sound Analysis and Detection, and the Potential for Precision Livestock Farming - A Sheep Vocalisation Case Study,” in *1st Asian-Australasian Conference on Precision Pastures and Livestock Farming*, no. October, pp. 1–7, 2017.

[14] V. Röttgen et al., “Vocalization as an indicator of estrus climax in Holstein heifers during natural estrus and superovulation,” *Journal of Dairy Science*, vol. 101, no. 3, pp. 2383–2394, 2018. doi:10.3168/jds.2017-13412.

[15] J. M. Watts and J. M. Stookey, “Vocal behaviour in cattle: the animal's commentary on its biological processes and welfare,” *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 67, no. 1–2, pp. 15–33, Mar. 2000. doi:10.1016/S0168-1591(99)00108-2

[16] C. Phillips, Ed., *Cattle Behaviour and Welfare*. Malden, MA, USA: Blackwell Science Ltd, 2002. doi: 10.1002/9780470752418

[17] S. Göncü and S. Bozkurt, “Holstein cow vocalization behavior during oestrus periods,” *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 276–279, 2019. doi:10.15406/mojes.2019.04.00165

[18] P. C. Schön, K. Hämel, B. Puppe, A. Tuchscherer, W. Kanitz, and G. Manteuffel, “Altered vocalization rate during the estrous cycle in dairy cattle,” *Journal of Dairy Science*, vol. 90, no. 1, pp. 202–206, 2007. doi:10.3168/jds.S0022-0302(07)72621-8

[19] J. Lee, S. Zuo, Y. Chung, D. Park, H. H. Chang, and S. Kim, “Formant-based acoustic features for cow's estrus detection in audio surveillance system,” in *11th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance, AVSS 2014*, pp. 236–240, 2014. doi:10.1109/AVSS.2014.6918674

[20] N. Ding, X. Cheng, and Z. Cui, “Design of Ruminant Sound Detection for Dairy Cows Based on DWT-MFCC,” in *5th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2018*, no. Icsai, pp. 856–860, 2019, doi: 10.1109/ICSAI.2018.8599308

[21] D. H. Jung et al., “Deep learning-based cattle vocal classification model and real-time livestock monitoring system with noise filtering,” *Animals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–16, 2021. doi:10.3390/ani11020357

[22] J. C. Bishop, G. Falzon, M. Trotter, P. Kwan, and P. D. Meek, “Livestock vocalisation classification in farm soundscapes,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 162, no. August 2018, pp. 531–542, 2019. doi:10.1016/j.compag.2019.04.020

[23] M. P. McLoughlin, R. Stewart, and A. G. McElligott, “Automated bioacoustics: methods in ecology and conservation and their potential for animal welfare monitoring,” *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 16, no. 155, p. 20190225, Jun. 2019. doi:10.1098/rsif.2019.0225

[24] V. Boddapati, A. Petef, J. Rasmusson, and L. Lundberg, “Classifying environmental sounds using image recognition networks,” *Procedia Computer Science*, vol. 112, pp. 2048–2056, 2017. doi:10.1016/j.procs.2017.08.250

[25] R. M. Alsina-Pagès, P. Llonch, G.J. Ginovart-Panisello, R. Guevara, M. Freixes, M. Castro, L. Duboc, E. Mainau, “Dairy Cattle Welfare through Acoustic Analysis: preliminary results of acoustic environment description.” in *Proceedings of Euronoise 2021, 25-27 October, 2021, Medeira, Portugal*, Available : <http://www.spacustica.pt/euronoise2021>. [Accessed: 20 Feb. 2022].

[26] K. A. Laurijs, E. F. Briefer, I. Reimert, and L. E. Webb, “Vocalisations in farm animals: A step towards positive welfare assessment,” *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 236. Elsevier B.V., Mar. 01, 2021. doi:10.1016/j.applanim.2021.105264

[27] D. H. Jung et al., “Deep learning-based cattle vocal classification model and real-time livestock monitoring system with noise filtering,” *Animals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–16, Feb. 2021. doi:10.3390/ani11020357

[28] F. Adam, “Amcrest Smart Player.” *amcrest.com*, November 06, 2015. [Online]. Available: <https://support.amcrest.com/hc/en-us/articles/213608377-Amcrest-Smart-Player-720P-HD-CVI> [Accessed: Dec.12.2021]

[29] S. L. Hopp, M. J. Owren, and C. S. Evans, *Animal acoustic communication: sound analysis and research methods*. Springer Science & Business Media, 2012.

[30] J. L. Semmlow, *Biosignal and medical image processing*. Second edition. CRC press, 2008.

[31] A. Subasi, *Practical guide for biomedical signals analysis using machine learning techniques: A MATLAB based approach*, Academic Press:Cambridge, MA, USA, 2019

[32] "Audacity Audio Editing Software", Available: <https://www.audacityteam.org/> (Accessed: Sep.01.2021)

* This article is an expanded version of the paper presented at the 5th International Conference on Engineering Technologies in Konya/TURKEY (ICENTE 2021).

This is an open access article under the CC-BY license

